



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

TEKNISTEN MUOVIEN KIERRÄTYS

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Iris Söderholm

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

SÖDRHOLM, IRIS:

Teknisten muovien kierrätys

Muovitekniikan opinnäytetyö, 52 sivua, 13 liitesivua

Kevät 2014

TIIVISTELMÄ

Työn ideana on tutustua teknisten muovien kierrätyksen eri vaiheisiin sekä tutkia miten kierrätys vaikuttaa materiaalien ominaisuuksiin. Tämä työ on osa projektia nimeltään ”Uusiomuovin vaikutukset valmistusprosessiin, tuotteiden ominaisuuksiin ja käyttöön”. Insinöörityön teko aloitettiin kesällä 2013.

Teoriaosuudessa käydään läpi lyhyesti, mitä tekniset muovit ovat, minkä jälkeen siirrytään kierrätyksen eri vaiheisiin. Päävaiheet ovat erottelu, rouhinta, pesu ja kuivaus.

Kokeellisessa osuudessa tutkitaan käytössä olleiden taajuusmuuttajien muoviosien kierrätystä. Taajuusmuuttajasta saaduille kuudelle materiaalille (PS, maalia sisältävä PS, musta PC, läpinäkyvä PC, PC/ABS sekä PA) tehdään mekaanisten kokeiden lisäksi palonkesto testi (UL 94), DSC sekä reologisia mittauksia.

Saatuja tuloksia vertaillaan kirjallisuudesta saatuihin arvoihin, jolloin saadaan kuvaa, miten käyttö sekä kierrätys ovat vaikuttaneet materiaalien ominaisuuksiin.

Asiasanat: tekniset muovit, mekaaninen kierrätys, taajuusmuuttaja

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Plastics Engineering

SÖDERHOLM, IRIS:

The recycling of engineering plastics

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 52 pages, 13 pages of appendices

Spring 2014

ABSTRACT

The purpose of this Bachelor's thesis was to learn about the mechanical recycling of engineering plastics and how recycling effects on the properties of plastics. The thesis is part of a project called "Post Consumer Plastics Recycling", which was started in summer 2013.

The theoretical part starts with an overview of engineering plastics. The main phases of the theoretical part are separation, grinding, washing and drying of plastics.

The experimental part examines recycling of discarded frequency changers. There are six types of plastic (PS, PS which contains paint, black PC, clear PC, PC/ABS and PA) in frequency changers that were selected to be tested. The plastics were tested with mechanical tests (for example tensile test and impact test), flammability test (UL94), DSC and rheology tests.

Test results were compared to reference values from literature, which told how use and recycling of frequency changers had affected to the properties of plastics.

Key words: engineering plastic, mechanical recycling, frequency changer

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	TEKNISET MUOVIT	2
2.1	Teknisten muovien kierrätys	2
2.2	Teknisten muovien kierrätyksen kannattavuus	3
3	MUOVIENTEROTTELU	4
3.1	Erottelu tiheyden mukaan	4
3.2	Erottelu sulamis/pehmenemislämpötilan mukaan	6
3.3	Elektrostaattinen erottelumenetelmä	7
3.4	IR-spektroskopiaan perustuva erottelu (MIR ja NIR)	8
3.5	Selektiivinen liuotus	9
3.6	Vaahdotus	11
3.7	Erottelu värin mukaan (konenäkö)	12
3.8	Erottelu kierrätysmerkkien mukaan	13
4	MUOVIENTEROUHINTA, PUHDISTUS JA KUIVAUS	14
4.1	Rouhinta	14
4.2	Puhdistaminen	15
4.2.1	Lian pehmentäminen	15
4.2.2	Lian irroittaminen	15
4.2.3	Lian ja muovin erottelu	16
4.3	Kuivaaminen	17
4.3.1	Mekaaninen kuivaus	17
4.3.2	Terminen kuivaus	18
4.4	Muovituotteesta raaka-aineeksi	18
5	MATERIAALISTA KOESAUVOIKSI	21
5.1	Laitteiden purkaminen ja materiaalin erottelu	21
5.1.1	PS ja kuparimaalattu PS	21
5.1.2	PC/ABS	22
5.1.3	Musta PC ja läpinäkyvä PC	22
5.1.4	PA	24
5.2	Purkuanalyysi	24
5.3	Materiaalien pesu	26
5.4	Materiaalien rouhinta	27

5.5	Materiaalien kuivaus ja koesauvoiksi ajo	28
6	KÄYTETYT TESTAUSMENETELMÄT JA – LAITTEET	30
6.1	Mekaaniset testit	30
6.2	Palonkestotestit	31
6.3	DSC	32
6.4	FTIR	32
6.5	Reologiset mittaukset	33
7	TULOKSET	34
7.1	Mekaaniset testit	34
7.2	Palonkesto testit	41
7.3	DSC	42
7.4	Reologiset mittaukset	42
7.5	Tulosten vertailu neitseelliseen materiaaliin	47
7.5.1	PS ja PS + maali	47
7.5.2	PC/ABS	48
7.5.3	PC musta	48
7.5.4	PC läpinäkyvä	49
7.5.5	PA	50
8	YHTEENVETO	52
	LIITTEET	57

1 JOHDANTO

Muovi on yksi eniten käytetyistä materiaaleista maailmalla. Suomessa kaatopaikalle joutuu vuosittain 130 000 tonnia muovia ja vain kolmannes kaikesta käytetystä muovista päätyy kierrätykseen tai poltettavaksi (Muovi matkalla kaatopaikoilta polttolaitoksiin 2012). Euroopan unioni on säätänyt jätehierarkian, jonka mukaan jätettä tulisi vähentää seuraavassa järjestyksessä:

1. materiaalin vähentäminen (esim. pakkauskoon pienentäminen)
2. uudelleenkäyttö (esim. ennen PET-pullot)
3. kierrätys
4. hyötykäyttö (esim. polttaminen energiaksi) (Muovien kierrätys 2013)

Teoriaosuudessa keskitytään tutkimaan erityisesti teknisten muovien kierrättämistä mekaanisesti, tutustutaan erilaisiin erottelumenetelmiin sekä muovien pesuun ja kuivaamiseen. Tavoitteena on saada mahdollisimman puhdasta ja hyvin eroteltua raaka-ainetta.

Kokeellisessa osuudessa tutkitaan taajuusmuuttajien muoviosien kierrättämistä. Tässä osuudessa on tarkoitus päästä vertailemaan monia vuosia käytössä olleita muoveja neitseelliseen materiaaliin, jotta nähdään, miten käyttö on vaikuttanut materiaalin erilaisiin ominaisuuksiin.

2 TEKNISET MUOVIT

Tekniset muovit ovat yksi kolmesta ryhmästä, joihin muovit on luokiteltu. Kaksi muuta ryhmää ovat valtamuovit ja erikoismuovit. Ryhmät on jaettu karkeasti teknisten ominaisuuksien ja hinnan perusteella, valtamuovit ovat halvimpia ja ominaisuuksiltaan heikoimpia ja erikoismuovit ovat kalleimpia. Erikoismuovien kilohinta voi kohota jopa yli 100 €/oon (Muovien luokitus 2013). Eri ryhmien rajat ovat häilyvät ja sama muovi saattaa kuulua moneen ryhmään.

Tekniset muovit ja valtamuovit on kehitetty syrjäyttämään muita materiaaleja, kuten puuta, metalleja ja lasia. Tästä syystä niillä saattaa olla esimerkiksi hyvä lämmönkestävyys tai iskunkestävyys tai kemiallinen kestävyys. Teknisiä materiaaleja käytetään sekä teollisuuden laitteissa että arkipäivän laitteissa, kuten tietokoneissa ja televisioissa, kun taas erikoismuoveja käytetään enemmän erikoisimmissa laitteissa, kuten avaruussukkuloissa, joissa materiaalin vaatimukset ovat aivan omaa luokkaansa.

2.1 Teknisten muovien kierrätys

Tutkimuksessa tutkittiin jopa kymmenen vuotta vanhoja tuotteita, joiden muovi kierrätettiin ja ominaisuudet testattiin, ja niitä verrattiin neitseellisen muovin ominaisuuksiin. Tutkimusten mukaan joidenkin teknisten muovien ominaisuudet eivät heikkene kierrätyksessä, tällaisia muoveja ovat esimerkiksi PC, PBT ja muunneltu PPO. Tietenkin kierrätettävän muovin lisäaineet (esim. täyteaineet, väriaineet sekä palonsuoja-aineet) vaikuttavat uusiomuovien laatuun joissakin tapauksissa heikentämällä mekaanisia ominaisuuksia. (Scheirs 1998, 304.)

Kierrätettyjen teknisten muovien monet ominaisuudet ovat edelleen paremmat kuin neitseellisten valtamuovien, vaikka ne laskevatkin suurimmalla osalla muoveista jonkin verran. Kierrätetty tekninen muovi ei välttämättä ominaisuuksiltaan sovellu enää tuotteeseen, jossa se alkuperäisesti oli, mutta se soveltuu muihin tuotteisiin, joissa materiaalilta ei vaadita niin hyviä ominaisuuksia.

Teknisten muovien kierrätyksen kasvusta kertoo paljon se, kuinka suuri prosentuaalinen osuus muovien kokonaispainosta on kierrätettyjä muoveja.

Esimerkiksi Ford Motors Co. on julkaissut kierrätettyjen muovien prosenttiosuuden verrattuna tuotteen eli auton kaikkien muoviosien painoon. Vuonna 1993 kierrätettyjen teknisten muovien osuus oli 1 %, kun taas vuonna 1996 se oli noussut jo 15 %:iin. (Scheirs 1998, 305.)

2.2 Teknisten muovien kierrätyksen kannattavuus

Valtamuovien kierrätys on kannattavaa silloin, kun kierrätettävää muovia on paljon, ja se saadaan puhdistettua ja eroteltua suhteellisen helposti. Eli mitä likaisempaa ja vaikeammin eroteltavaa muovia jäte sisältää, sitä kannattamattomampaa kierrätys on. Yleensä valtamuovia kierrätettäessä niiden ominaisuudet kärsivät jonkin verran (molekyylit katkeilevat). Kierrätettävän muovin keräys, erottelu ja pesu taas synnyttävät kustannuksia. Nämä kustannukset nostaisivat muovien kilohintaa niin suureksi, ettei olisi millekään yritykselle kannattavaa ostaa muovia, jonka ominaisuudet ovat huonommat kuin neitseellisen, mutta kilohinta suurempi. Tämän takia valtamuovien kierrätys ei ole kaikissa tilanteissa kannattavaa.

Valtamuoveihin verrattuna teknisten muovien kilohinta on vähintään kaksinkertainen (Meskanen & Järvelä 2000, 17). Jo tämän asia tekee teknisistä muoveista kannattavamman kierrättää. Lisäksi nykyään on muodikasta käyttää kierrätettyä materiaalia tuotteissa, joten kysynnän lisääntyessä kierrätetyn muovin kilohinta saattaa kohota yli neitseellisen materiaalin kilohinnan.

3 MUOVIENTEROTTELU

Harvoin kierrätettävä jätte on vain yhtä tiettyä muovia ja tämän muovin yhtä tiettyä lajiketta, mutta sen sijaan kierrätettävä jätte saattaa sisältää monia eri materiaaleja: muoveja, metalleja, puuta, lasia ja niin edelleen. Kaikesta tästä jätteestä on eroteltava muovit erilleen, ja näistä muoveista eroteltava ne halutut muovit ja niiden haluttujen muovien tietyt lajikkeet.

Muovia eroteltaessa on käytettävä eri tekniikoita kuin eroteltaessa metalleja. Metalleja on aika helppo erottaa toisistaan, niillä on suuret tiheyserot, erilaiset sähköiset ja magneettiset ominaisuudet sekä ne ovat erivärisiä. Muovit sen sijaan voidaan värjätä minkä värisiksi tahansa, tiheyserot ovat pienet, osa muoveista on tiheydeltään samoja eikä sähköisissä ja magneettisissa ominaisuuksissakaan ole suuria eroja. (Biddle 2011.)

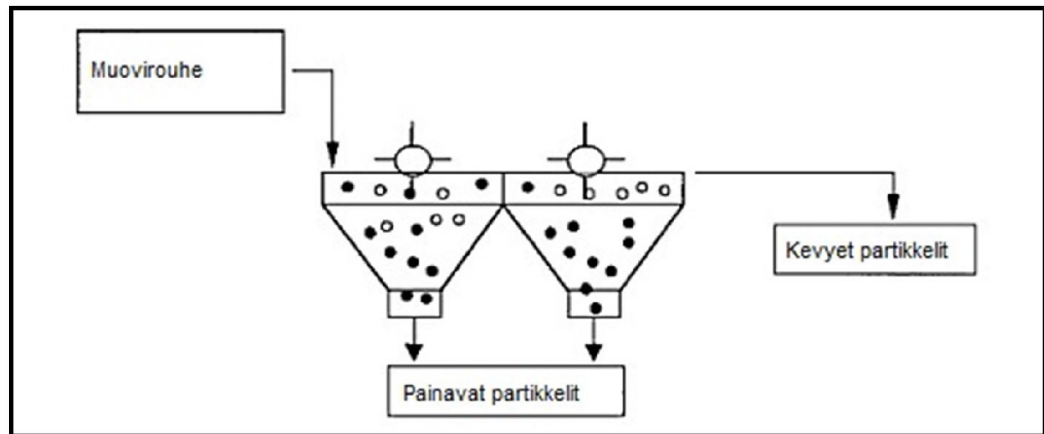
Jotta muovien kierrättäminen olisi kannattavaa, täytyy erottelu tehdä hyvin ja tarkasti, mutta kuitenkin siten, etteivät siitä syntyvät kustannukset nosta kierrätetyn muovin kilohintaa liian suureksi.

Erottelumenetelmä valitaan aina sen mukaan mitä muoveja kierrätettävä jätte sisältää, mutta aina ei voida tietää, mitä muoveja tarkalleen jätte sisältää. Erottelu voidaan tehdä vaiheittain, jolloin saadaan lähes kaikki muovit erilleen tai voidaan keskittyä erottelemaan vain se tietty muovi muista materiaaleista. Käytetyimmät erottelumenetelmät tällä hetkellä ovat tiheyden mukaan erottelu, värien mukaan erottelu sekä IR-spektroskopiaan perustuva erottelu, mutta myös muita käytetään. Jotta saadaan mahdollisimman hyvin eroteltua kaikki muovit, kytketään useita eri erottelumenetelmiä samaan linjaan tai samoja erottelumenetelmiä peräkkäin.

3.1 Erottelu tiheyden mukaan

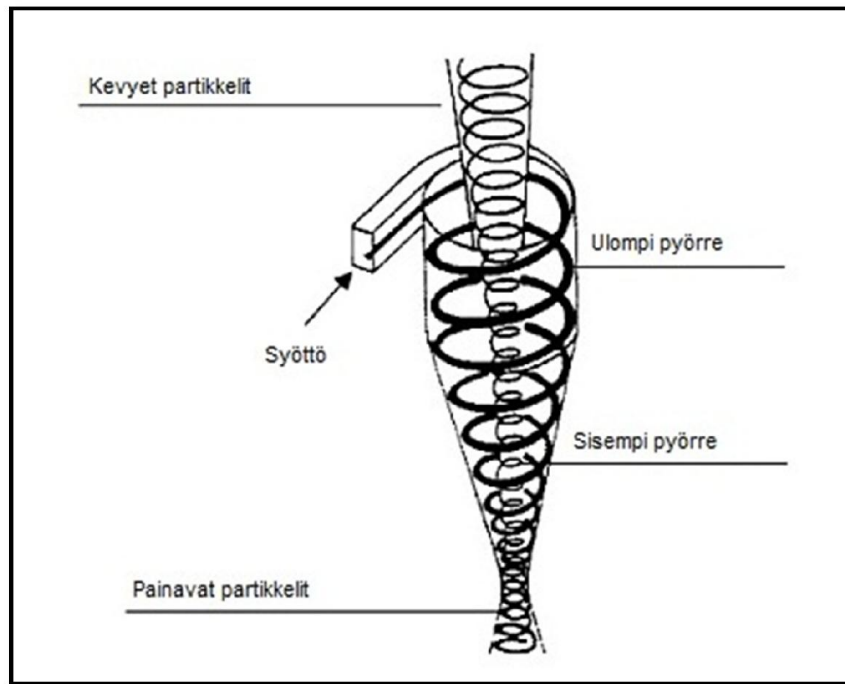
Tiheyden mukaan erottelu voidaan jakaa märkä- ja kuivamenetelmiin riippuen siitä, käytetäänkö erottelussa väliaineena nesteitä vai ilmaa. Märkämenetelmät toimivat samalla esipesuna materiaaleille. Ilmaseulonnalla taas saadaan paperit eroteltua muoveista.

Märkämenetelmistä tunnetuin ja vanhin on float-sink-erottelu. Jos eroteltavan muovin tiheys on pienempi kuin väliaineen, muovi kelluu, mutta jos sen tiheys ja samalla paino on suurempi, muovi uppoaa. Yleisimmin käytetyt väliaineet float-sink-erottelussa ovat vesi, vesi/metanoli sekoitus, NaCl liuos ja ZnCl_2 liuos. Vettä käytetään yleisimmin väliaineena eroteltaessa polyolefiineja muista muoveista. Kuviossa 1 on esitelty float-sink menetelmää. (Scheirs 1998, 4.)



KUVIO 1. Float-sink menetelmä (La Mantia 2002, 109)

Hydrosykloni on yksi märkämenetelmistä. Hydrosykloni toimii siten, että rouhitut muovipartikkelit ovat paineenalaisen nesteen (yleensä veden) seassa. Tämä seos ohjataan pyörivään liikkeeseen tornin yläosasta. Keskipakovoiman ja painovoiman vaikutuksesta painavimmat partikkelit liikkuvat kohti pyörteen ulkoreunaa, kun taas kevyemmät liikkuvat kohti pyörteen keskikohtaa, jossa sijaitsee ilmatila (Delgado ja Stenmark 2005, 8). Kuviossa 2 on esitelty tämän menetelmän perusperiaate. Samalla periaatteella toimii sentrifugi, jolla voidaan erotella muoveja ominaispainon mukaan.



KUVIO 2. Hydrosyklonin periaate (La Mantia 2002, 110)

Kuivamenetelmä voidaan jakaa moneen eri erottelumenetelmään (esim. siksakerottelu, pyörre-erottelu sekä leijukerros-erottelu), jotka kaikki toimivat imu- tai puhallusperiaatteella. Rouhittuun muoviin puhalletaan ilmaa, jolloin kevyt materiaali lähtee ilmavirran mukana, kun taas painavampi materiaali tippuu gravitaation voimasta. Jotta ilmaseulonta toimisi, täytyy muovien tiheyseron olla huomattava, ja siltikään ei saada muoveja 100 %:sti eroteltua toisistaan. (Thiele 2007, 280.)

3.2 Erottelu sulamis/pehmenemislämpötilan mukaan

Muoveja voidaan erotella pehmenemis- ja sulamislämpötilan avulla, jos ero muovien lämpötiloissa on huomattava, esimerkkinä PVC:n pehmenemislämpötila on 200 °C ja PET:n 260 °C (Scheirs 1998, 54). Jotta tällaista erottelua pystytään käyttämään hyödyksi, pitää muovityyppi tietää, jolloin voidaan arvioida muovien pehmenemis- tai sulamislämpötilat.

PVC- ja PET-hiutaleet levitetään tasaiseksi kerrokseksi liukuihmalle, joka on lämmitetty sellaiseen lämpötilaan, jossa PVC pehmenee, mutta PET pysyy hiutaleina. Liukuihna kulkee ympäri, jolloin PET-hiutaleet tippuvat alemmalle

tasolle, kun taas pehmentynyt PVC tarttuu kiinni liukuhihnaan. PVC raapataan irti hihnalta tämän jälkeen. (Scheirs 1998, 54.)

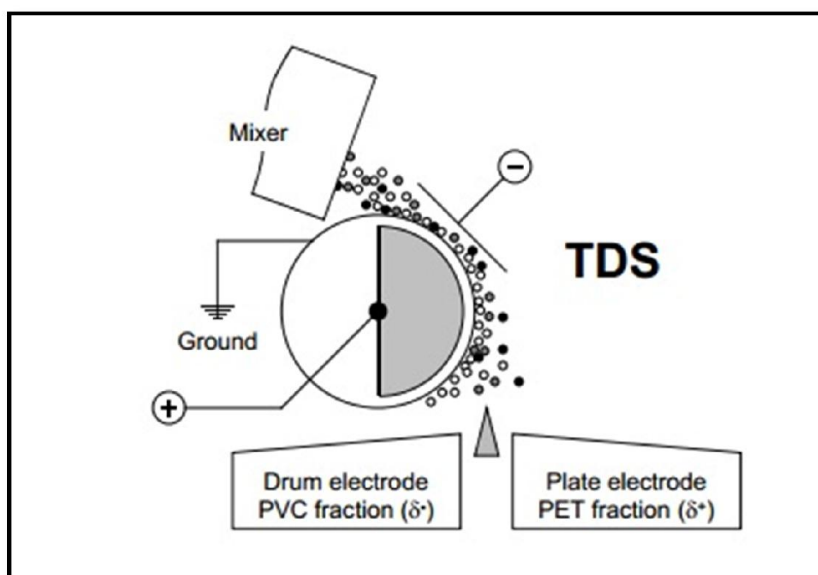
Kun PVC:tä erotetaan PET:stä, kutsutaan menetelmää nimellä Refakt. Recource Energy Venatures on kehittänyt muuten samalla periaatteella toimivan systeemin, mutta siinä hyödynnetään muovien pehmenemislämpötilan sijaan sulamislämpötilaa. (Scheirs 1998, 54.)

3.3 Elektrostaattinen erottelumenetelmä

Kun kaksi erilaista, varauksetonta materiaalia osuvat toisiinsa, vaihtuvat elektronit näiden rajapinnalla. Kun nämä kaksi erotetaan toisista nopeasti, jää toinen varaukselta negatiiviseksi ja toinen positiiviseksi. Tätä triboelektristä ilmiötä käytetään hyödyksi elektrostaattisessa erottelussa. Erottelu voidaan myös tehdä sähkönsäilytyskyvyn mukaan. Eroteltavien muovien pitää olla puhtaita, kuivia eikä niissä saa olla pinnoitteita, jotka vaikuttavat pinnan varaukseen. (Delgado ja Stenmark 2005, 27.)

Elektrostaattisessa erottelussa muovit voidaan varata ennen kuin ne ohjataan sähkökentän läpi kahdelle erimerkkiselle elektrodille. Negatiivinen elektrodi vetää puoleensa positiivisesti varautuneita muoveja, kun taas positiivinen elektrodi vetää puoleensa negatiivisesti varautuneita muoveja. Kun materiaalin annetaan pudota vapaasti sähkökentän läpi, kutsutaan sitä vapaapudotusliike-erotteluksi. (Poropudas 2011, 36.)

Toinen menetelmä on telaerottelu, joka on esitelty kuviossa 3. Varattu muovirouhe ohjataan telalle, joka toimii positiivisena elektrodina. Telan toisella puolella on levy, joka toimii negatiivisena elektrodina. Näiden elektrodien välistä ohjataan varaukselliset muovit, joista positiivisesti varautunut muovi tippuu painovoiman takia alas, kun taas negatiivisesti varautunut muovi jää telaan kiinni. Tällä menetelmällä voidaan erotella esimerkiksi PET ja PVC toisistaan. (Delgado ja Stenmark 2005, 28.)



KUVIO 3. TELAEROTTELU PVC:lle ja PET:lle (Delgado ja Stenmark 2005, 28)

3.4 IR-spektroskopiaan perustuva erottelu (MIR ja NIR)

Infrapunasäteily eli IR-säteily on sähkömagneettista lämpösäteilyä, joka osuessaan materiaaliin, saa aikaan materiaalin molekyyliissä värähdys- tai pyörähdysliikkeen. Aaltopituudeltaan IR-säteily on näkyvän valon ja mikroaaltoalueen väliin jäävä alue, joka voidaan jakaa kolmeen osaan: NIR (Near-IR eli lähi-infrapuna), MIR (Mid-IR eli keski-infrapuna) ja FIR (Far-IR eli kaukoinfrapuna). Muovien erottelussa käytetään hyödyksi lähinnä NIR- ja MIR-infrapunaa. IR-spektroskopia toimii periaatteessa siten, että se mittaa näytteeseen absorboituneen säteilyn määrää aallonpituuden funktiona. Näytteeseen absorboituu säteilyä sen mukaan, millainen kemiallinen sidos molekyyliellä on. (Kyparissakos 2012, 17–18.)

NIR-valon aaltopituus on suunnilleen näkyvästä valosta MIR-valoon eli $14000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. NIR- spektroskopiolla voidaan erotella läpinäkyviä tai kevyesti värjättyjä muoveja, tummia muoveja NIR-menetelmällä ei voida tunnistaa. NIR-spektroskopiolla erotellaan usein kotitalousjätteestä muovit sekä tunnistetaan tekniset muovit kulutustuotteista esimerkiksi tietokoneista ja autojen osista. NIR-menetelmällä voidaan luotettavasti ja nopeasti erotella muoveja. Lisäksi NIR-säteily pureutuu syvemmällä muovin pintaan kuin MIR, joten maalit ja muut pinnoitteet eivät häiritse erottelua. (Delgado ja Stenmark 2005, 18.)

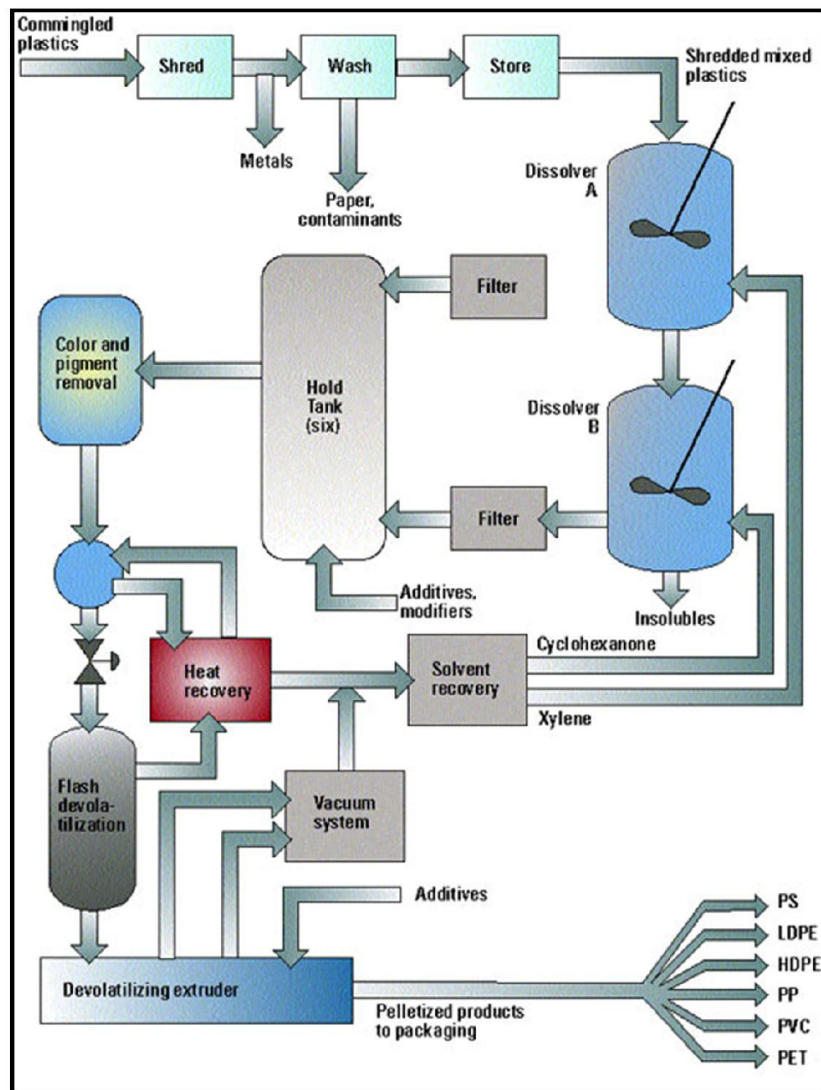
MIR-valon aallonpituus on $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$. MIR-säteily ei läpäise muovia yhtä hyvin kuin NIR, minkä takia pinnassa olevat pinnoitteet tai maalit heikentävät erottelun tulosta. Sen sijaa MIR:llä voidaan erotella tummia ja värjättyjä muoveja. (Scheirs 1998, 20.)

3.5 Selektiivinen liuotus

PE-LD:tä, PE-HD:tä, PP:tä, PET:tä, PVC:tä ja PS:ää voidaan erotella toisistaan käyttämällä selektiivistä liuosta hyödyksi. Pelkkään ksyleeniliuokseen liukenee eri lämpötiloissa neljä edellä mainitusta muovista: PS ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$), PE-LD ($75\text{ }^{\circ}\text{C}$), PE-HD ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja PP ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$). PVC ja PET liukenevat ksyleenin ja sykloheksanonin seokseen, PVC $120\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa ja PET $180\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. (Scheirs 1998, 55–57.)

Käytännössä Rensselaer Polytechnic Institution kehittämä liuotustekniikka toimii seuraavasti. Tankkiin, joka sisältää noin $15\text{ }^{\circ}\text{C}$:een lämpöisen liuoksen, kaadetaan muovihutaleita. PS liukenee lähes välittömästi liuokseen, kun taas muut muovit säilyttävät muotonsa. Liuos siivilöidään ja otetaan talteen. Muut muovit jäävät siivilään. Jäljelle jäänyt kiinteä muovi laitetaan uuteen liuokseen, jonka lämpötila on korkeampi, noin $75\text{ }^{\circ}\text{C}$:ta. PE-LD ja PE-LLD liukenevat ja muut muovit jäävät kiinteäksi. Tätä toistetaan, niin kauan että jäljelle jää vain PVC ja PET, joiden kohdalla vaihdetaan pelkkä ksyleeniliuos ksyleeni/sykloheksanoni seokseen. Ensin liuotetaan PVC, jonka jälkeen jäljelle jäänyt PET liuotetaan vielä. (Scheirs 1998, 57.)

Muovia sisältävä liuos pumpataan suurella paineella lämmönvaihtimeen, jonka lämpötila on nostettu $250\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$:een, sieltä se siirretään venttiilien läpi haihdutuskammioon, jossa suuriosa liuoksesta haihtuu. Haihtunut liuos otetaan talteen, ja sitä käytetään uudelleen. Kammioon jäänyt muovi ajetaan haihdutusekstruuderin läpi, jossa erotellaan monomeerit ja viimeiset liuoksen jäämät. Edellä mainitut kohdat näkyy kuviossa 4. Tämän jälkeen muovi on valmista uudelleenkäyttöön. (Scheirs 1998, 57.)



KUVIO 4. Selektiivisen liuotuksen perusperiaate (Huyhua 2011, 3)

Selektiivisen liuotuksella voidaan erotella muoveja, jotka ovat likaisia, maalattuja ja sisältävät liimaa, eivätkä ne vaikuta prosessiin. Tällä erottelumenetelmällä voidaan erotella monikerrostuotteiden eri muovit sekä ns. sukulaismuoveja esimerkiksi polyamidi 6 ja polyamidi 66. Haittapuolena tässä erottelumenetelmässä on sen turvallisuusriskit sekä huono ympäristöystävällisyys; vaikka suurin osa liuoksesta voidaan kierrättää uudelleen käyttöön, osa häviää prosessissa. (Scheirs 1998, 56–58.)

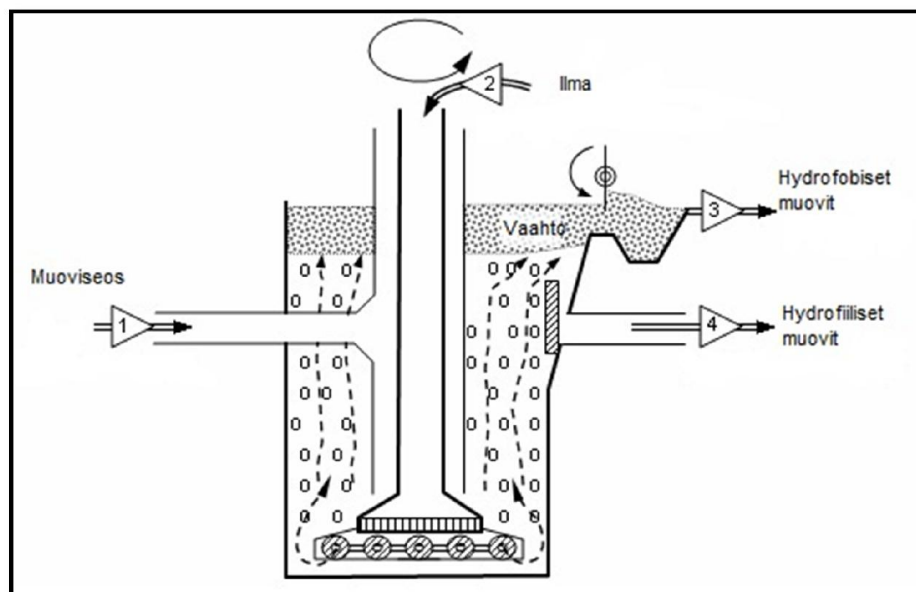
3.6 Vaahdotus

Vaahdottamalla voidaan erotella hydrofobisia ja hydrofiilisiä muoveja toisistaan. Hydrofobiset muovit ovat vettä hylkiviä, kun taas hydrofiiliset ovat vettä imeviä. Tätä perusideaa käytetään hyödyksi, kun muoveja erotellaan vaahdottamalla. Toimintaperiaate näkyy kuviossa 5. Kun vesipohjaiseen lietteeseen syötetään ilmakuplia, kiinnittyvät ne hydrofobisiin muoveihin, ja nämä nousevat lietteen pinnalle muodostaen vaahdon, kun taas hydrofiiliset muovit jäävät pinnan alapuolelle. (Delgado ja Stenmark 2005, 10.)

Vaahdotuksessa voidaan vaikuttaa muovin hydrofiilisuuteen tai –fobisuuteen lisäämällä lietteeseen erilaisia kemikaaleja, joita ovat aktivoijat, depressantit, pH:n säännöstelijät, kokoojat sekä vaahdotteet (Delgado ja Stenmark 2005, 10).

Aktivoijien tehtävä on muuttaa muovin pintaa hydrofobiseksi, kun taas depressanttejen tehtävä on päinvastainen eli saada muovit hydrofiiliseksi (Hiltunen 2013, 21–22). pH:n säännöstelijöillä yritetään muuttaa pH:ta, jotta kokoojat toimisivat paremmin. Kokoojakemikaalit tarttuvat muovin pintaan tehden siitä hydrofiilisen tai –fobisen materiaalin (Hiltunen 2013, 21–22).

Vaahdotekemikaaleilla vaikutetaan veden ja ilman muodostamaan rajapintaan, jotta saadaan alempi pintajännitys, jonka seurauksena syntyy paremmin vaahtoa (Hiltunen 2013, 21–22).



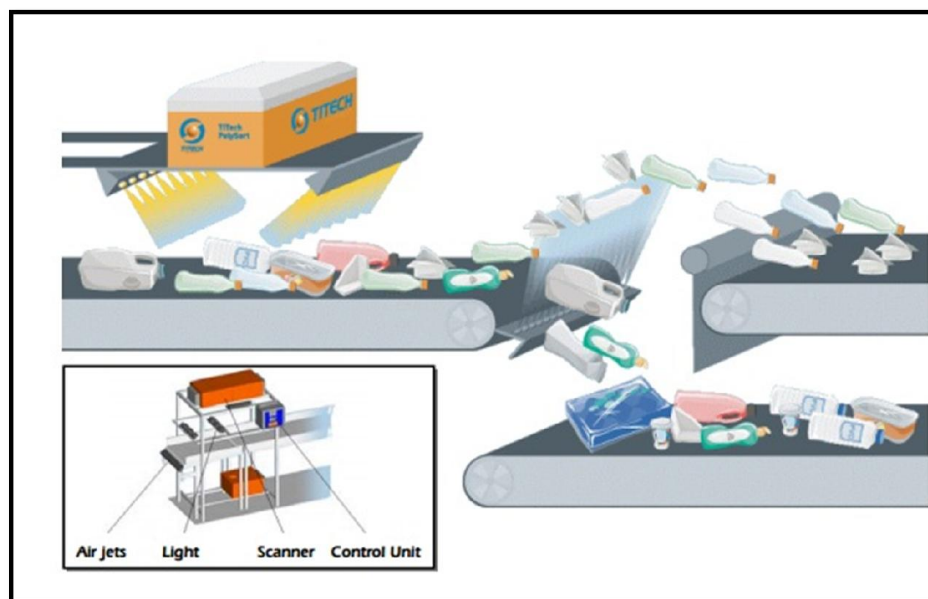
KUVIO 5. Vaahdotuksen toimintaperiaate (Wikipedia, 2013)

Lisäämättä mitään myrkyllisiä tai vaarallisia kemikaaleja, pystytään tällä menetelmällä erottelemaan ABS, PS-HI ja PP muista muoveista. Tekniikka on kuitenkin mennyt harppauksia eteenpäin. Nykyään, lisäämällä tiettyjä kemikaaleja, saadaan PET eroteltua PVC:stä, vaikkakin molemmat ovat pinnaltaan hydrofobisia. Kemikaalit saavat PET:n pinnan hydrofiiliseksi, jolloin se uppoaa ja PVC nousee vaahdon mukana pinnalle. (Delgado ja Stenmark 2005, 11.)

3.7 Erottelu värin mukaan (konenäkö)

Värin mukaan erottelu voidaan tehdä manuaalisesti käsin tai automaattisesti koneella. Useimmin nykypäivänä käytetään koneita erottelussa, eikä niinkään enää ihmisiä muuten kuin koneiden käyttäjinä, valvomassa prosessia.

Konenäön avulla voidaan tarkkailla muovin palasten kokoa, pinta-alaa, muotoa, väriä ja sekä pinnan rakennetta. Vertaamalla näitä koneen saamia tietoja jo olemassa olevaan dataan, pystytään muovi tunnistamaan. Konenäön avulla voidaan erotella värillisiä sekä läpinäkyviä muoveja. Esimerkiksi värillistä ja läpinäkyvää PET:iä voidaan erotella konenäön avulla, tunnistamalla värjätty PET heijastuneesta valosta. Värierotellulla saadaan noin 95 % eroteltua kierrätettävästä materiaalista. (Delgado ja Stenmark 2005, 12.)



KUVIO 6. Esimerkki konenäön avulla erottelusta (Delgado ja Stenmark 2005, 13)

Tämän jälkeen tunnistetut muovit pitäisi saada eroteltua muista materiaaleista. Tämä tapahtuu usein ilman avulla. Muovikappaleet kulkevat liukuhihnaa pitkin, kun tunnistettu kappale osuu kohdalle, se puhalletaan toiselle liukuhihnalle. Muut materiaalit jatkavat liukuhihnaa pitkin. Tämä vaihe on esitetty kuviossa 6.

3.8 Erottelu kierrätysmerkintöjen mukaan

Pakkausmateriaalin Euroopan parlamentti ja neuvoston direktiivi 94/62/EY, jossa on määritelty eri pakkausmateriaaleille (myös muoville) oma numerointi- ja tunnistusjärjestelmä, joka näkyy kuviossa 7. Näiden käyttö pakkauksissa on vapaaehtoista. Kierrätysmerkissä on niin sanottu Mobius Loop-merkki, jonka keskellä on muovin numero.



KUVIO 7. Muovien kierrätysmerkinnät (Kodin muovipakkausten keräyskokeilu 2013)

Autojen muovi- ja kumiosien merkitsemistä koskevia standardeja käytetään direktiivin 2003/138/EY ohjeiden mukaan. Direktiivin mukaisesti kaikki muoviosat, jotka painavat yli 100 g, ja kumiosat, jotka painavat yli 200 g pitää merkitä. Kylmälaitteiden muoviosia merkitään standardin ISO 11469 mukaan. Standardin käytöstä on päätetty komission päätöksessä 2000/40/EY. Jos kylmälaitteen muoviosa painaa yli 50 g, on siitä löydyttävä materiaalimerkintä. Tämä ohjeistusta ei sovelleta suulakepuristettuihin muoviosiin. (Eerola 2005, 15.)

4 MUOVIEN ROUHINTA, PUHDISTUS JA KUIVAUS

Ennen kuin kierrätettävästä muovista saadaan uusiomateriaalia, pitää se erottelun lisäksi pestä, rouhia ja kuivata. Se, missä järjestyksessä edellä mainitut vaiheet tapahtuvat, riippuu materiaaleista sekä valituista erottelumenetelmistä. Osa vaiheista voidaan yhdistää; esimerkiksi jos rouhinta tapahtuu vedessä, toimii se samalla esipesuna. Myös kuivaus voi toimia samalla viimeisenä puhdistusvaiheena. Erottelumenetelmätkin voivat toimia osana pesu- tai kuivausvaihetta, kuten esimerkiksi märkämenetelmät tiheyden mukaan erottelussa ovat myös pesuvaiheita samalla. Yhdistämällä näitä vaiheita säästetään sekä energiaa, vettä että aikaa.

4.1 Rouhinta

Muovi voidaan esirouhia hieman isompaan palakokoon, minkä jälkeen se pestään, ja vasta pesun jälkeen jälkimurskataan varsinaiseen kokoon (15–30 mm). Muovi voidaan rouhia 2-vaiheisesti peräkkäin, ensin isompaan kokoon ja sen jälkeen haluttuun varsinaiseen kokoon, ja vasta sen jälkeen pesuun. (Maatalouden kalvomuovijätteen hyötykäyttövaihtoehdot Kinnula-Pihtipudas-Viitasaari-alueella 2011, 3-4)

Palakoon valinta ja missä vaiheessa rouhitaan, valitaan materiaalin likaisuuden ja sen mukaan minkä kokoisena kappaleet tulevat rouhittavaksi sekä sen mukaan miten rouhetta tullaan jatkojalostamaan. Esimerkiksi jos rouhittava materiaali on erittäin likaista, suoritetaan esipesu ennen rouhintaa, jotta terät eivät kuluisi. Isot kappaleet taas joudutaan rouhimaan monessa vaiheessa, ennen kuin päästään haluttuun palakokoon. Joissakin tapauksissa ruiskuvaluun menevää muovia ei tarvitse granuloida, vaan riittää, että se on rouhittu oikeaan kokoon.

Rouhinta voidaan tehdä muovin ollessa märkää tai kuivaa. Kun muovi rouhitaan vedessä, toimii se samalla esipesuna muoville, poistaen suurimman osan vesiliukoisista epäpuhtauksista. Toinen hyvä puoli vedessä rouhittaessa on, että terä kuluu vähemmän kuin jos rouhinta tehtäisi kuivalle muoville. Muoveissa oleva lika kuluttaa myös terää, joten kannattavaa on pestä muovi ennen rouhintaa. (Thiele 2007, 280–281.)

Murskaimet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan rouheen koon mukaan: karkeat murskaimet, välikoon murskaimet ja hienot jauhimet. Karkeat murskaimet ovat yleensä enemmän käytössä rakennusjätteen ja muiden kovien materiaalien esimurskaimena. Erilaisia murskaimia ovat leukamurskaimet, iskumurskaimet, vasara-, veitsi- ja jauhatusmyllyt.

4.2 Puhdistaminen

Muovin kierrätyksessä puhdistus on yksi tärkeimmistä vaiheista, jotta saadaan taattua kierrätetylle muoville hyvät mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Muoviin jääneet epäpuhtaudet sekä muut muovit ja muut materiaalit heikentävät välittömästi muovin ominaisuuksia. Jotta muovien kierrätys olisi kannattavaa, valmiin, kierrätetyn muovin ominaisuuksien pitäisi olla lähelle alkuperäisen, neitseellisen muovin ominaisuuksia.

4.2.1 Lian pehmentäminen

Varsinkin kiinteän lian irrottamiseen vaaditaan hyvää liotusta. Lika voi olla myös nestemäisessä muodossa, kuten öljyjä ja rasvoja. Tämä kohta muovin pesusta on esipesua, jolloin ei oleteta että kaikki lika saadaan irrotettua. Usein esipesun jälkeen rouhitaan muovi oikeaan kokoon, mutta joskus rouhinta tapahtuu ennen esipesua, muovin ollessa kuivaa. (Brandrup 1996, 236–237.)

Esipesuja on erilaisia, mutta yksi vaihtoehto on kouru jossa muoveja ja pesunesteitä liikuttaa hitaasti pyörivä ruuvi. Parempi tulos saadaan, jos muovihutaleet pysyvät kokoajan liikkeessä. Tarkoituksena on saada heikennettyä muovin ja lian pintojen välille muodostunutta tartuntaa. (Brandrup 1996, 236–237.)

4.2.2 Lian irroittaminen

Lian pehmentämisen jälkeen seuraava vaihe on lian irroittaminen, joka tapahtuu voimakkaan kiertovirtauksen avulla. Lian irtoaminen perustuu suureen suhteelliseen nopeuteen materiaalin ja nesteen välillä, joka luodaan sekoitussäiliössä, joita on monen mallisia. Lian irrottamiseen käytettävää pesuria

kutsutaan turbo tai friction washer:iksi, jonka kuva on kuviossa 8. Näitä voidaan kytkeä peräkkäin, jolloin muovien puhtaus paranee. (Brandrup 1996, 236–237.)



KUVIO 8. Friction washer (Alibaba 2013)

Riippuen mitä muovia pestävä rouhe sisältää voidaan se pestä jopa 80–90 °C:ssa. Pesuliuoksena voidaan käyttää esimerkiksi orgaanisia happoja, kuten sitruunahappoa, tai alkaaliliuoksia, kuten natriumhydroksidia. Pesuaineen valintaan vaikuttaa muovien kemiallinen kestävyys.

4.2.3 Lian ja muovin erottelu

Jos on käytetty vahvoja pesuaineita, pitää rouhe huuhdella puhtaaksi ennen kuivaamista, jotta saadaan kaikki pesuainejäämät pois. Kun lika on saatu irrotettua muovista, pitää se vielä erotella. Mineraalipitoinen lika saadaan eroteltua esimerkiksi hydrosyklonin avulla, joka toimii samalla periaatteella kuin muovien erottelumenetelmä. Jos muovi ei ime vettä itseensä, voidaan viimeiseksi ennen kuivausta suihkuttaa rouhetta puhtaalla vedellä, jotta saadaan mahdollisimman puhdasta muovia. Ei-mineraalipitoiset liat saadaan eroteltua poistamalla pesuneste ja viimeistään mekaanisen kuivauksen avulla. (Brandrup 1996, 237–238.)

4.3 Kuivaaminen

Kuivaaminen on tärkeää sekä puhdistuksen että jatkokäsittelyn kannalta. Muovia ei voida lähteä granuloimaan eikä ruiskuvalamaan, ennen kuin kosteusprosentti on tarpeeksi pieni. Kosteus vaikuttaa ruiskuvalussa sekä tuotteen ulkonäköön että laatuun. Jotkin materiaalit ovat herkempiä kosteudelle kuin toiset. Esimerkiksi polyeteenitereftalaatti ja polyamidit ovat erittäin kosteutta imeviä kun taas polyeteenin ja polypropeenin pintaan saattaa tiivistyä kosteutta, mutta muovit itsessään eivät ime kosteutta. Kosteutta imeviä muoveja kutsutaan hygroskooppisiksi muoveiksi.

4.3.1 Mekaaninen kuivaus

Mekaanisessa kuivauksessa käytetään hyödyksi painovoimaa, joka pakottaa veden pois materiaalista. Samalla muovista poistuu kosteuden mukana pienet ja kevyet likapartikkelit, jotka ovat jääneet vielä pesun jälkeen kosteuden takia muovin pintaan. Yksi paljon käytetty kuivain on sentrifugi, joka pyörittäessä materiaalia pakottaa veden irti muovin pinnasta. Sentrifugin kuva on kuviossa 9.



KUVIO 9. Sentrifugikuivain (Panchal 2013)

4.3.2 Terminen kuivaus

Terminen kuivaus perustuu lämmön siirtymiseen. Lämpö voi siirtyä materiaalista kolmella eri mekanismilla, jotka ovat konduktio eli johtuminen, säteily ja konvektio eli kuljetus. Lämpö siirtyy lämpimästä viileämpää tasoittaen lämpöeroja, kun tämä tapahtuu materiaalin sisällä tai kahden vierekkäisen materiaalin välillä, kutsutaan sitä konduktioksi. Lämpösäteily ei tarvitse väliainetta edetäkseen. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka lämmittää kohdetta, johon se törmää. Konvektiossa tarvitaan väliainetta, joka kuljettaa lämpöenergiaa virtauksen mukana. Tämä on tehokkain tapa kuljettaa lämpöä.



KUVIO 10. Terminen kuivauslaitteisto (Panchal 2013)

Kuivauslaitteita on kolmenlaisia: kuumailmakuivureita, kuivailmakuivureita sekä alipainekuivureita. Kuviossa 10 on yhdenlainen termien kuivauslaitteisto. Kuumailmakuivureilla kuivataan lähinnä pintakosteita muoveja, kuten polyeteeniä sekä polypropeenia, jotka eivät ime itseensä kosteutta, mutta joiden pinnalle saattaa tiivistyä vettä.

4.4 Muovituotteesta raaka-aineeksi

Jotta kierrätettävistä tuotteista saadaan eroteltua se haluttu materiaali, käy se useita eri rouhinta-, puhdistus- ja erotteluvaiheita läpi. Kierrätettävä materiaali

sisältää halutun muovin lisäksi erilaisia likoja, kiinteitä ja nestemuotoisia, riippuen alkuperäisen tuotteen käyttökohteesta. Sen lisäksi kierrätettävä materiaali saattaa sisältää metalleja, lasia, keraameja, puuta sekä esimerkiksi etikettejä. Kun kaikki nämä on saatu eroteltua ja jäljelle on jäänyt pelkät muovit, pitää niistä saatua eroteltua se tietty, haluttu muovilajike, esimerkiksi kaikista polyeteenityypeistä vain se haluttu PE-HD. Nämä kaikki on saatava erotettua, jotta saadaan puhdasta ja vain tietynlaatuista muovia.

Voidaan ottaa esimerkiksi vaikka polyeteenitereftalaatin eli PET:n erottelu, sillä se on Suomessa tunnetuin kierrätettävä muovi. Suomessa PET pulloja on kierrätetty jo 1980-luvulta, jolloin tosin käyttöön tuli uudelleen täytettävät pullo. Vasta 2008 aloitettiin uusien, kierrätetyistä materiaaleista tehtyjen pullojen käyttö. Pulloja ei enää sellaisena täytetä, vaan pullo murskataan ja saaduista materiaaleista tehdään uusia pulloja tai esimerkiksi vaatteita. PET-pulloon käytetystä materiaalista jopa 50 % saattaa olla kierrätettyä materiaalia eli niin sanottua R-PET:iä eli recycling-polyeteenitereftalaattia. (Suomen Palautuspakkaus Oy 2013.)

Palautetut pullo paljitetaan, jotta ne saadaan kuljetettua kierrätyskeskuksiin, joissa niiden jatkokäsittely aloitetaan. Paalit puristetaan mahdollisimman pieneksi, jotta syntyisi mahdollisimman vähän kuljetuskustannuksia. Paalit avataan ja levitetään liukuhihnalle, mahdollisimman tasaiseksi ja leveäksi kerrokseksi, jotta jokainen pullo pysytään erottelemaan. Erottelu on tärkein vaihe koko kierrätyksessä. (Thiele 2007, 277.)

Materiaalien erottelu aloitetaan kokonaisilla pulloilla liukuhihnalla konenäön avulla. Konenäkö lajittelee hihnalla kulkevia kappaleita värin ja materiaalin mukaan, erityisesti tässä vaiheessa keskitytään PVC:n ja PET:n erotteluun. Erotellut muovipullo viedään esipesuun, jossa suurimmat liat saadaan irrotettua ennen kappaleiden rouhimista, jotta saadaan säästettyä terää. Usein ensimmäisen rouhinnan jälkeen on sijoitettu ilmaseulonta, jolla saadaan seulottua suurin osa etiketeistä. Jos käytetään kahta ilmaseulontaa, toinen ilmaseulonta on kuivauksen jälkeen. Riippuen minkä kokoista rouhetta halutaan lopputulokseksi, jauhantaprosesseja voi olla eri kohdissa, joko materiaalin ollessa pesu tai erotteluvaiheessa tai kuivauksessa. (Thiele 2007, 277.)

Joissain tilanteissa matalatiheyksisten materiaalien erottelu toimii myös esipesuna. Float-sink-menelmää tai hydro syklonimenetelmää voidaan käyttää korkkien sekä muiden matalatiheyksisten muovien erottelussa polyeteenitereftalaatista. Joskus harvoissa tilanteissa käytetään vaahdotusmenetelmää, mutta se nostaa kustannuksia.

Kun haluttua materiaali, eli tässä tapauksessa PET, on saatu eroteltua muista materiaaleista, voidaan materiaali pestä joko happamassa tai emäksisessä kuumapesussa. Tällä varmistetaan, että kaikki liimanjäänteet on saatu puhdistettua materiaalista. Pesuaineena voi toimia happamat sitruunahappo tai emäksisellä natriumhydroksidilla. Pesun jälkeen on materiaalin huuhtelu puhtaalla vedellä, jossa poistetaan jäljelle jääneet pesuaineet. (Thiele 2007, 283)

Viimeinen vaihe muovirouheelle on kuivaus. Kuivaus tapahtuu usein ensin mekaanisesti, minkä jälkeen vielä varmistetaan materiaalin kuivuus lämpökuivauksella.

5 MATERIAALISTA KOESAUVOIKSI

5.1 Laitteiden purkaminen ja materiaalin erottelu

Materiaalit käytiin hakemassa Vantaalla sijaitsevasta ABB:n toimipisteestä, joka on keskittynyt huoltamaan taajuusmuuttajia. Kaikki taajuusmuuttajat, joista materiaalit kerättiin, olivat olleet käytössä. Materiaaleista kolme tunnistettiin materiaalimerkintöjen mukaan, osassa näistä materiaaleista oli myös merkintä miltä vuodelta kappaleet ovat. Loput materiaalit tunnistettiin DSC:n avulla.

5.1.1 PS ja kuparimaalattu PS

Polystyreeniä eli PS:ssä löytyi taajuusmuuttajista kotelosta, jotka on valmistettu vuosien 1996 ja 2001 välillä. Polystyreenistä valmistettuja koteluita ei käytetä enää taajuusmuuttajissa. Etukotelot on maalattu kuparimaalilla, joka näkyy kuviossa 11. Pohjissa olevia koteluita ei ole maalattu kuparimaalilla. Kotelossa oli materiaalimerkintä, jonka mukaan erottelu tapahtui.



KUVIO 11. Polystyreeniset etukotelot, joissa on kuparimaali

Polystyreenillä on pieni muottikutistuma, minkä takia sitä käytetään kohteissa, joissa vaaditaan, että valmis ruiskuvalutuote on pysynyt mitoissa. (Koleva 2013, 1-3.)

5.1.2 PC/ABS

Uudemmat kotelot on valmistettu PC/ABS:stä. Uudet kotelot ovat merkintöjen mukaan vuosilta 2006–2011. PC/ABS-koteloita löytyi sekä harmaita että valkoisia, jotka tunnistettiin materiaalimerkintöjen mukaan. Harmaat ja valkoiset kotelot käsiteltiin yhdessä. Koteloista suurin osa oli pölyisiä, sekä sisälsi paljon tarroja. Kuviossa 12 näkyy sekä valkoinen että harmaa kotelo.

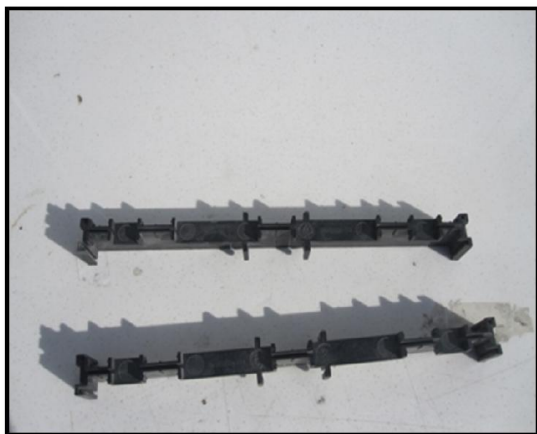


KUVIO 12. Valkoiset ja harmaat PC/ABS-kotelot

PC/ABS-seosta käytetään paljon elektroniikka- sekä ajoneuvosovelluksissa sen hyvän iskunkestävyyden sekä hyvän lämmönkestävyyden vuoksi. Lisäksi materiaalia on helppo prosessoida, ja se pysyy hyvin mitoissa. Ja kuten useat muutkin muovit, PC/ABS:sia voidaan värjätä, kuten koteloista huomaa. (PC/ABS – polykarbonaatti/akryylinitriili-butadieeni-styreeni 2013.)

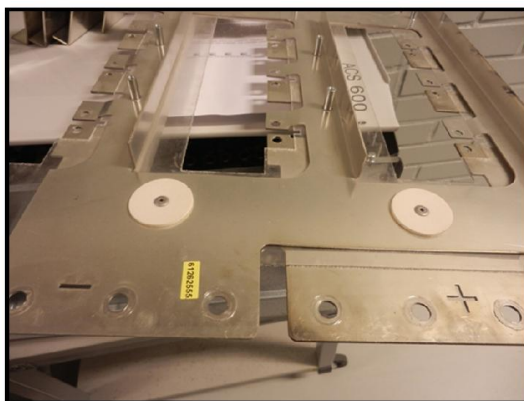
5.1.3 Musta PC ja läpinäkyvä PC

Musta polykarbonaatti on käytössä taajuusmuuttajissa puolijohteiden ja hilaohjainkorttien välille tulevissa mekaanisissa ohjainosissa, jotka ovat esitettynä kuviossa 13. Nämä osat ovat olleet taajuusmuuttajan sisällä, joten eivät olleet niin likaisia kuin kotelot, eikä niiden päällä ollut tarroja.



KUVIO 13. Mekaaniset ohjainosat

Lisää polykarbonaattia löytyi taajuusmuuttajan sisältä eristelevynä. Näiden tehtävänä oli toimia DC-kiskojen välissä eristeenä. Kuviossa 14 näkyy eristelevy paikallaan taajuusmuuttajassa. Näitä ei ole ruiskuvalettu, vaan ne on vain lämpömuovattu levystä. Läpinäkyvä PC tunnistettiin DSC:n avulla, sillä eristelevyissä ei ollut materiaalimerkintöjä. Eristelevyt olivat osittain hyvinkin nokisia ja palaneita.

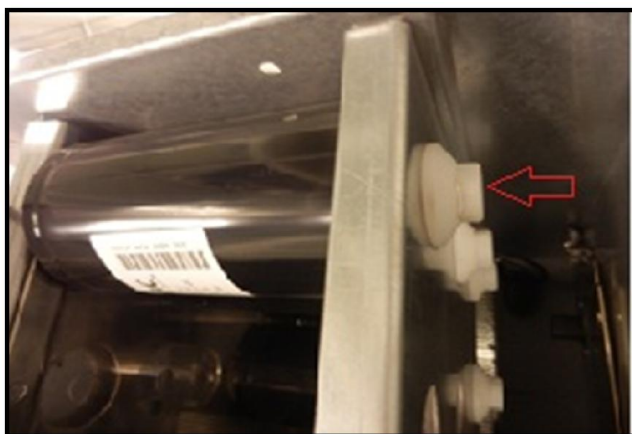


KUVIO 14. Läpinäkyvä polykarbonaatti taajuusmuuttajassa

Polykarbonaatilla on korkea kovuus, lujuus, sitkeys sekä jäykkyys, sekä pieni muottikutistuma, joka tekee siitä hyvän materiaalin mekaanisiksi ohjainosiksi. Lisäksi sen hyviä sähköisiä erityisominaisuuksia ei heikennä kosteus. (Nykänen 2013, 1-3.)

5.1.4 PA

Polyamidia löytyi taajuusmuuttajasta DC-kondensaattoreiden kiinnitysmuttereista. Kiinnitysmutterit tunnistettiin DSC:n avulla joko polyamidi 610 tai polyamidi 612. Mutterit olivat vaihtelevasti likaisia, jotkin mutterit olivat rasvaisia, osa hyvinkin pölyisiä. Kuviossa 15 nuoli osoittaa mutterin paikan taajuusmuuttajassa.

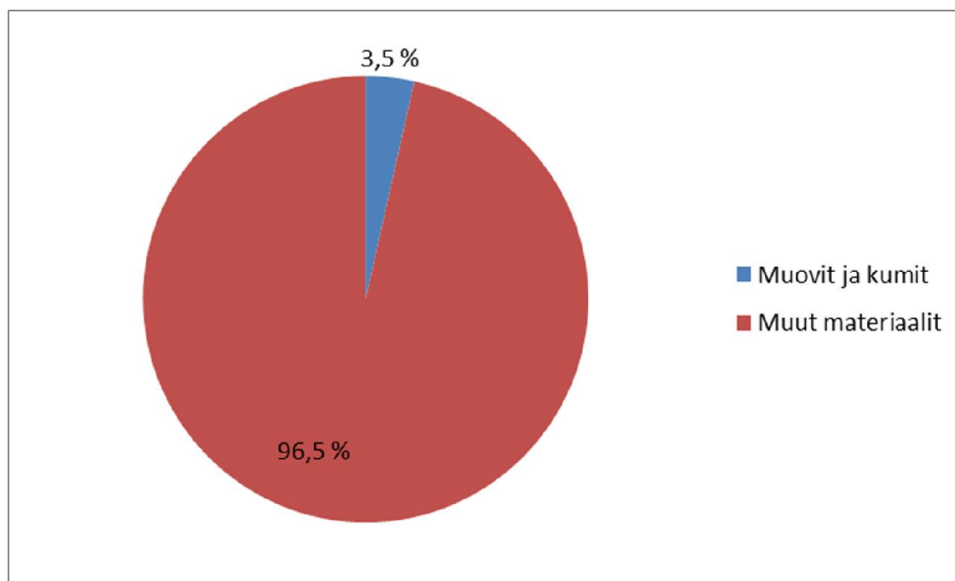


KUVIO 15. Mutteri taajuusmuuttajassa

Polyamideilla on korkea lujuus, jäykkyys sekä kovuus. Tärkeää myös polyamidiselle mutterille on materiaalin hyvä kulutuksenkestävyys. Lisäksi polyamidi 610:llä ja 612:sta on pieni veden absorptio sekä hyvä mittapysyvyys. (Nykänen 2013, 2,4.)

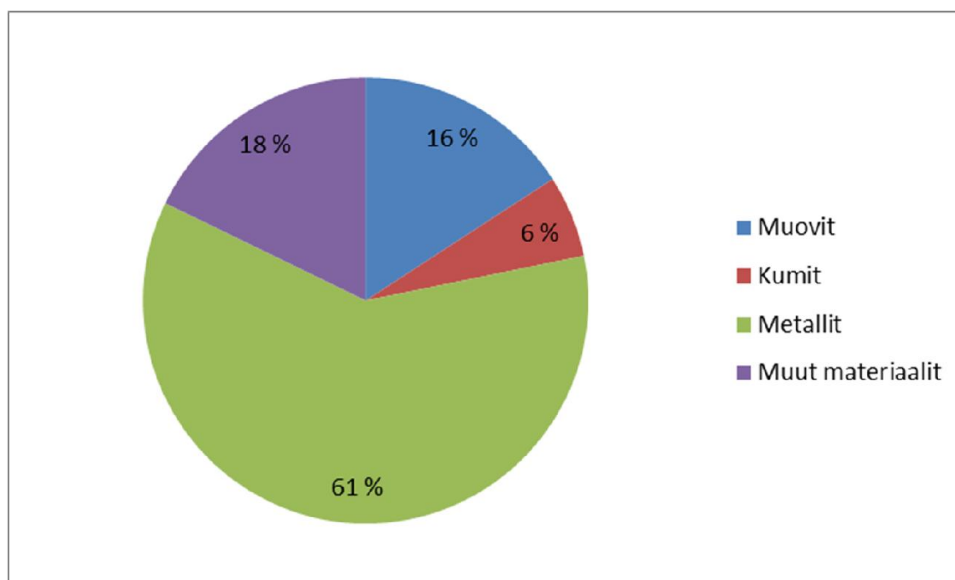
5.2 Purkuanalyysi

Yksi taajuusmuuttaja purettiin kokonaan, sieltä eroteltiin muovit ja ne punnittiin. Muovien ja kumien osuus taajuusmuuttajan kokonaispainosta on suhteellisen pieni vain noin 3,5 %, kuten kuvioista 16 näkyy. Suurimmat osat muovista olivat taajuusmuuttajan etukotelo sekä pohjakotelo. Kokonaispainoa taajuusmuuttajalla oli 51,4 kg, josta muoveja ja kumeja oli 1,8 kg.



KUVIO 16. Muovien osuus taajuusmuuttajan kokonaispainosta

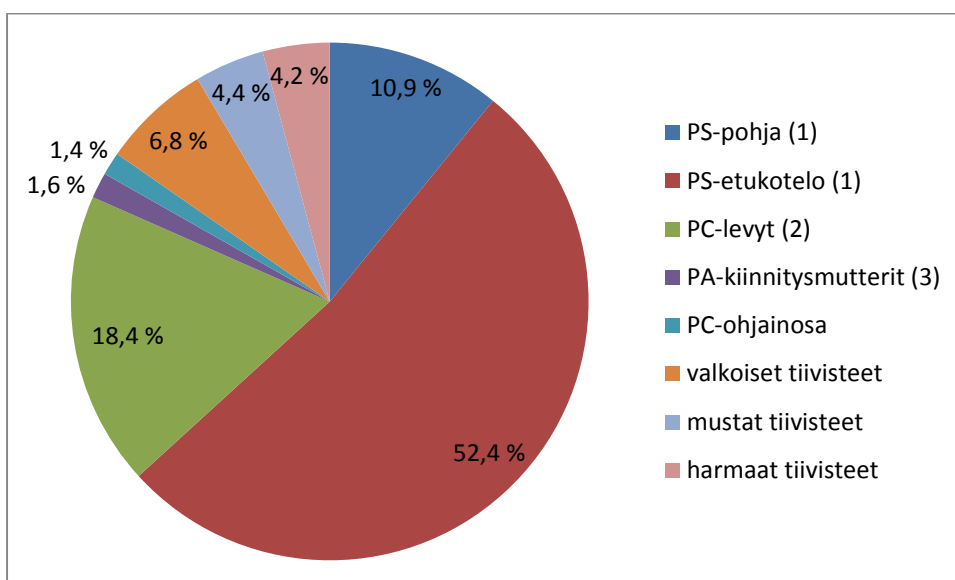
Kun verrataan taajuusmuuttajan muovien osuuksia esimerkiksi auton prosenttiosuuksiin, jotka näkyvät kuviossa 17, huomataan suuri ero. Muoveja ja kumeja autosta löytyi yhteensä 22 %. Auto on painanut keskimäärin 1400 kg, josta muoveja ja kumeja on 308 kg. Jo tämä selittää sen miksi autojätteestä syntyvien materiaalien kierrättäminen on kannattavaa. (Besland, Klink, Rouilloux, ja Weill 2012, 2-3.)



KUVIO 17. Purkuanalyysi autolle vuonna 2010 (Besland, Klink, Rouilloux, ja Weill 2012, 2)

Jos purkuanalyysissa muovien osuutta olisi mitattu tilavuudella, olisi tulokset aivan eri luokkaa. Vaikka osa muoviosista oli isokokoisia niiden keveyden takia, ne eivät nosta muovien prosenttiosuutta suuresti. Metallit taas ovat painoltaan aivan eri luokkaa.

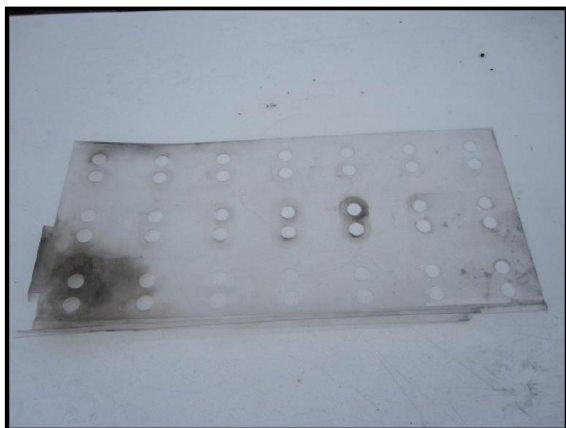
Kuviosta 18 löytyy muovien prosenttiosuus kaikkiin muoveihin verrattuna. Kuten kuviosta 18 huomataan, taajuusmuuttajan pohjana ja kantena toimivaa polystyreeniä löytyi suurin määrä taajuusmuuttajasta, reilusti yli puolet kaikesta muovista oli PS:ssää. Polystyreenin jälkeen eniten taajuusmuuttajasta löytyi polykarbonaattia levynä. Pienimmät osuudet muodostuvat polyamidi- sekä polykarbonaattiohjainosassa.



KUVIO 18. Taajuusmuuttajan muovien prosenttiosuudet verrattuna muovien yhteispainoon

5.3 Materiaalien pesu

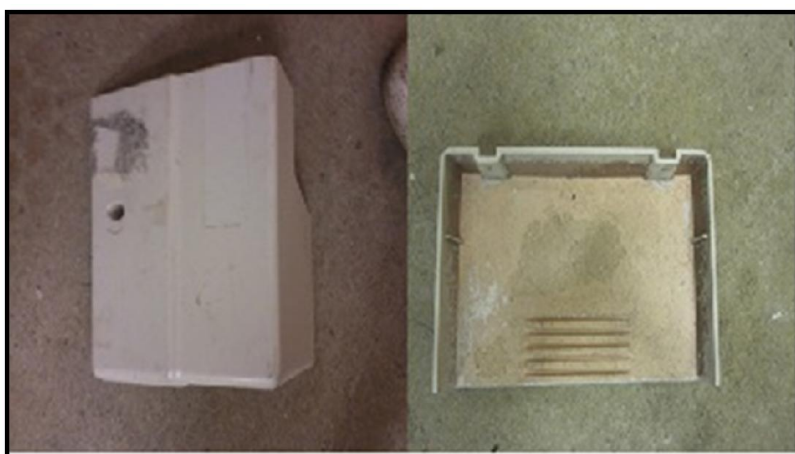
Materiaalit pestiin pesukoneessa 60 °C:ssa Tampereen teknillisellä yliopistolla. Osalla materiaaleista käytössä oli linkous, mutta siitä luovuttiin jossain vaiheessa, sillä osa muoveista raapi pesukoneen lasia. Jotkin laitteen osat olivat likaisempia kuin toiset: esimerkiksi eristelevyt, jotka olivat kirkasta PC:tä, olivat hyvinkin nokisia ja osin palaneita. Esimerkkikuva näkyy kuviossa 19. Likaisimmat eristelevyt jätettiin rouhimatta.



KUVIO 19. Palanut eristelevy

Osassa kotelosta oli tarroja, joihin jäi pesun jälkeen liimajälkiä.

Kuparimaalatuista PS-kotelosta lähti osittain maali. Kuviossa 20 on esitetty tällaisia koteluita. Jos maalatut kotelot pestäisiin kunnolla, luultavasti päästäisi eroon kaikesta kuparimaalista.



KUVIO 20. Vasemmassa kuvassa näkyy pesun jälkeen jäänyt liimatahra, toisessa kuvassa näkyy kuinka kuparimaali on irronnut kotelosta

5.4 Materiaalien rouhinta

Materiaalien rouhinta tapahtui rapid granulator – rouhimella Tampereen teknillisellä yliopistolla. Materiaalit laitettiin jääkaappiin rouhimista edeltävänä päivänä, jotta rouhinta olisi helpompaa. Rouhinta tapahtui kuivalle materiaalille. Kuparimaalattu PS päätettiin rouhia erillään pelkästä PS:stä, jotta niiden

ominaisuuksia voidaan vertailla. Kuviossa 21 on kaikista muista paitsi PS-rouheesta kuvat.



KUVIO 21. Rouheet vasemmalta oikealle: PC/ABS, PC (musta), PA, PS (kuparimaali) ja PC (läpinäkyvä), kuvasta puuttuu PS-rouhe

5.5 Materiaalien kuivaus ja koesauvoiksi ajo

Materiaalit kuivattiin ja ruiskuvalettiin Lahden ammattikorkeakoululla. Osa materiaaleista vaati huolellista kuivaamista, osaa taas ei tarvinnut erikseen kuivata, riippuen materiaalin ominaisuuksista. Joitakin materiaaleja jouduttiin uudelleen rouhimaan, sillä Lahdessa olevassa ruiskuvalukoneessa suppilossa oleva reikä, josta materiaali pääsee ruuville, on noin 2 cm, joten suuret rouheet jäävät siihen tukkoon.

PS ja kuparimaalattu PS

Polystyreenin ajo oli helppoa, sillä se ei vaatinut kuivausta ennen ruiskuvalamista. Pelkkä polystyreenirouhe oli pienempi kokoista ja tuli suppilolta ruuville helposti, ilman apua. Kuparimaalattu polystyreeni sen sijaan vaati hieman suppilon ravistamista, jotta isompikokoiset rouheet eivät jäisi suppiloon tukkeeksi.

Kuparimaalatusta polystyreenistä tehdyissä koesauvoissa näkyi selvä ero verrattuna pelkästä polystyreenistä tehtyihin koesauvoihin. Kupari näkyi koesauvoissa. Pelkät PS-sauvat näyttivät tasalaatuisilta, eikä kummissakaan sauvoissa näkynyt pintavirheitä eikä imuja.

PC/ABS

PC/ABS:ssä kuivattiin pari tuntia noin 90 °C:ssa, sillä PC/ABS on vettä itseensä imevä muovi, jota ei voida ajaa kosteana. Kosteus vaikuttaa koesauvan ulkonäköön sekä laatuun heikentäen sitä. Rouhe oli suurta sekä sähköistä, joten se jäi jumiin suppilon. Suuret rouheet jumittuivat suppilon pieneen suuhun, jolloin mitään rouhetta ei tullut ruuville asti. Muovisella putkella saatiin työnnettyä tukosta eteenpäin, jolloin materiaalia saatiin ruuville asti. Valmiit sauvat näyttivät tasalaatuisilta, pintaan ei tullut pintavirheitä, eikä sauvoissa ollut sulamatonta materiaalia.

Musta PC ja läpinäkyvä PC

Sekä mustaa että läpinäkyvää polykarbonaattia kuivattiin uunissa noin pari tuntia 90 °C:ssa. Musta polykarbonaatti tuli melko hyvin suppilolta ruuville, ja vain pari kertaa joutui ravistamaan suppiloa, jotta se ei menisi tukkoon. Läpinäkyvä polykarbonaatti rouhittiin uudelleen, sillä se näytti niin suurikokoiselta rouheelta, että luultavasti suppilo olisi mennyt tukkoon jatkuvasti. Uudelleen rouhitu läpinäkyvä PC tuli suppilosta ruuville ilman minkäänlaista ongelmaa.

Johtuen joko materiaalien sisältämisestä lisäaineista, kuten esimerkiksi palonestoaineista, tai kosteudesta, koesauvojen pintaan tuli ”raitoja”. Osaan läpinäkyvästä polykarbonaatista tehtyihin sauvoihin tuli lisäksi joitakin kuplia sauvan sisälle.

PA

Koska polyamidin ajaminen ensimmäisellä kerralla ei onnistunut, sillä materiaali oli liian kostea, päätettiin polyamidi kuivata viikonlopun yli 60 °C:ssa, ja pari tuntia ennen ajon aloittamista nostaa uunin lämpötila 80 °C:een. Kun polyamidia alettiin ajaa toisen kerran, ei se enää räiskynyt eikä suuttimesta tullut höyryä. Koesauvoissa ei näkynyt pinnassa raitoja eikä muitakaan virheitä.

6 KÄYTETYT TESTAUSMENETELMÄT JA – LAITTEET

6.1 Mekaaniset testit

Mekaanisten testien avulla voidaan vertailla materiaaleja toisiinsa, tutkia haluttuja mekaanisia ominaisuuksia sekä nähdä materiaalien käyttäytymistä tietyissä olosuhteissa. Mekaanisia testejä varten näytteitä vakioitiin vakio-olosuhdelaboratoriossa ($+23 \pm 2$ °C, 50 ± 5 % RH) vähintään 16 tuntia.

Vetokoe

Vetokokeessa standardin määrittelemää koekappale kiinnitetään kahden leuan väliin, ja sitä venytetään vakionopeudella ja siitä mitataan venytystä vastustava voima sekä venymä. Samalla nähdään, miten materiaali käyttäytyy vedon aikana. Tulokseksi saadaan jännitys-venymäkäyrä, josta voidaan määritellä esimerkiksi vetokimmomoduuli E , myötölujuus σ_m , myötövenymä ϵ_m , murtolujuus σ_b ja murtovenymä ϵ_b . (Seppälä 2008, 69-70.)

Vetokokeet tehtiin Lloyd EZ20 vetokoneella. Vetokoneen tarkkuusluokka standardin SFS-EN ISO 527 mukaisesti on 1 (SFS-EN-ISO 7500-1). Vetonopeus koneella oli 50 mm/min. Venymä määriteltiin niin sanotusta nimellisestä venymästä eli kiinnitysleukojen siirtymästä.

Iskukoe

Iskukokeessa mitataan kappaleen murtumiseen vaadittavaa voimaa. Charpy-koe on heilahdusvasarauskoe, jossa koekappale on tuettu molemmista päistä, ja se isketään keskeltä poikki. Vasaran koon valinta riippuu materiaalin kovuudesta. Iskulujuus lasketaan absorboidun energian ja koekappaleen poikkipinta-alan suhteena [J/m^2]. (Seppälä 2008, 78.)

Iskukokeet suoritettiin standardin ISO 179 mukaisesti lovettuna huoneenlämpöisille sekä loveamattomana jäähdytetyille koekappaleille. Jäähdytetyt koekappaleet olivat vähintään 16 tuntia -25 °C:ssa. Testauksessa koelaitteistoa ei jäähdytetty. Koekappaleiden mitat olivat keskimäärin $79,8 \times 10,1 \times 3,9$ mm. Koekappaleet lovettiin lovityypillä C (ISO 179), jossa leveys loven

kohdalta on noin 8,0 mm. Lovetut testikappaleet iskettiin 0,5 J iskuvasaralla, loveamattomat 5 J tai 2 J iskuvasaralla, ja tulokset määritettiin kymmenen iskun keskiarvona.

Tiheyden mittaus

Näytteiden tiheys määritettiin standardiin SFS-EN ISO 1183 pohjautuvan ns. Sartoriusmenetelmän mukaisesti. Tiheysmäärittelyn testausliuoksena käytettiin tislattua vettä. Näytteiden tiheys määritettiin koesauvan kapeasta, suorasta osuudesta kahden mittauksen keskiarvona.

Shore D-kovuus

Kovuuskokeessa mitataan materiaalin pinnan kykyä vastustaa pinnan muodonmuutosta staattisen kuormituksen alaisena. Shore D-kokeessa D-kärkeä painetaan muovin pintaan tietyn ajan tietyllä massalla. D-kärki on tarkoitettu muoveilla kovien kerta- ja kestopuovien kovuuden mittaukseen. D-kärki on terävä kärki, kun taas pehmeille muoveille tarkoitettu A-kärki on katkaistun kartion muotoinen. Shore D-kokeen tuloksia ei voida vertailla muihin kovuusmittausten tuloksiin. (Seppälä 2008, 84.)

Kovuus määritettiin standardin SFS-EN ISO 868 mukaisesti tyypin D durometrilla. Kovuus mitattiin viidestä pisteestä vetokoesauvan suurimmalta pinnalta 1 s ja 15 s mittausajoilla, ja näistä laskettiin keskiarvo ja keskihajonta.

6.2 Palonkestotestit

UL Safety Standard 94 on polymeerien palamistesti, jossa materiaalia poltetaan 10 sekuntia kaasuliekillä, minkä jälkeen kaasuliekki poistetaan. Jos muovi jatkaa palamista, mitataan aika siitä kun kaasuliekki poistetaan siihen, kun muovi sammuu. Poltettava kappale voidaan asettaa pysty- tai vaakasuoraan liekkiin nähden. Poltettavan kappaleen alle laitetaan pumpulituppo, joka saattaa syttyä palamaan, jos kappaleesta tippuu palavaa ainetta. Nämä huomioidaan paloluokittelussa. (Seppälä 2008, 110-111.)

Näytteitä oli pidetty uunissa ennen koetta seitsemän vuorokautta 70 °C:ssa. Kaasun pitäisi olla metaania, mutta tässä kokeessa oli käytetty hieman erilaista poltinta ja kaasuna nestekaasua. Näyte oli aseteltu pystyyn liekkiin nähden. Lisäksi näytteiden alle oli laitettu pumpulituppo.

6.3 DSC

DSC eli differentiaalinen pyyhkäisykalorimetri mittaa näytteessä tapahtuvien reaktioiden vapautuvan tai sitovan energian määrän. DSC:llä voidaan määritellä esimerkiksi muovien lasittumislämpötila, sulamispiste, kiteisyysaste, hajoamislämpötila, sulamis- ja kiteytymislämmöt sekä ominaislämpökapasiteetti. Näyte laitetaan upokkaaseen, joka laitetaan tyhjän näyteastian kanssa samaan uuniin. Upokkaat voivat olla kannellisia tai ilman kantta, mutta upokkaiden täytyy olla samanlaisia. Näytteet jäähdytetään tietyllä nopeudella, tiettyyn lämpötilaan, minkä jälkeen ne kuumennetaan tiettyyn lämpötilaan, tietyllä nopeudella. Tulokseksi saadaan käyrä näytteen luovuttamasta tai sitomasta energiasta tietyssä aikayksikössä lämpötilan funktiona. (Seppälä 2008, 60-61.)

6.4 FTIR

FTIR:llä eli Fourier Transform Infrared spectroscopyllä voidaan tutkia näytteen infrapuna-säteilyn absorptiospektri tai transmissiospektriä. Materiaalin eri molekyylit absorboivat infrapunasäteilyä eri aallonpituuksilla, jotka sitten spektrometrin avulla tunnistetaan. FTIR:ä käytetään lähinnä orgaanisten molekyyliden tunnistamiseen. FTIR:llä saadaan selville näytteen IR-spektrejä, joista pystytään päättelemään kemiallisia sidoksia sekä atomiryhmiä.

Vertailemalla näitä jo tunnettujen aineiden absorptiopiikkeihin voidaan näyte tunnistaa tietyksi materiaaliksi. Vertailemalla tuloksia spektrikirjastoon saatetaan saada jopa materiaalin valmistaja selville. Pitää kuitenkin ottaa huomioon, että kirjastoon on ajettu vain joitakin tiettyjä materiaaleja ja niiden tiettyjä valmistajia, joten vertailutulokset ovat vain suuntaa antavia.

FTIR:n toivottiin selvittävän kumpaa polyamidia 610 vai 612 materiaali oli, mutta tulokseksi tuli vain tuotenimiä, joista ei selvinnyt, mitä nylonia ne olivat, eikä

tuotenimistä löytynyt tietoa googlesta, joten FTIR ei antanut mitään uutta informaatiota. FTIR:n tulokset löytyvät liitteistä 2-6.

6.5 Reologiset mittaukset

Reologisissa mittauksissa tutkitaan polymeerien virtausta ja muodonmuutosta ajan ja voiman funktiona. Tässä työssä mittaukset on tehty sulaindeksilaitteella sekä kapillaarireometrillä.

Sulaindeksi

Sulaindeksilaitteessa materiaali laitetaan sylinteriin, joka on lämmitetty haluttuun lämpötilaan. Kun materiaali on sulanut, laitetaan sylinteriin mäntä, jonka päällä on tietyn painoinen paino. Painon ja männän tarkoituksena on puristaa tutkittava materiaali sylinterin päässä olevasta pienestä reiästä läpi. Ulos tullut materiaali otetaan talteen tietyltä ajalta ja punnitaan. Tulokset ilmoitetaan yksikössä g/10min, jos ollaan mitattu MFR:ää (melt flow rate), ja jos ollaan mitattu MVR:ää (melt flow volume), niin yksikössä cm³/10min. (Seppälä 2008, 96.)

Kapillaarireometri

Kapillaarireometrissä materiaali laitetaan sylinteriin lämpiämään, jolloin se sulaa ja saavuttaa tasaisen lämpötilan. Kun esilämmitys on tehty, voidaan hydraulisesti tai mekaanisesti säädettävällä männällä työntää materiaali kapillaarin läpi. Tällä menetelmällä voidaan mitata muun muassa leikkausjännitysyä, leikkausnopeutta ja viskositeettia. (Seppälä 2008, 96-97.)

7 TULOKSET

7.1 Mekaaniset testit

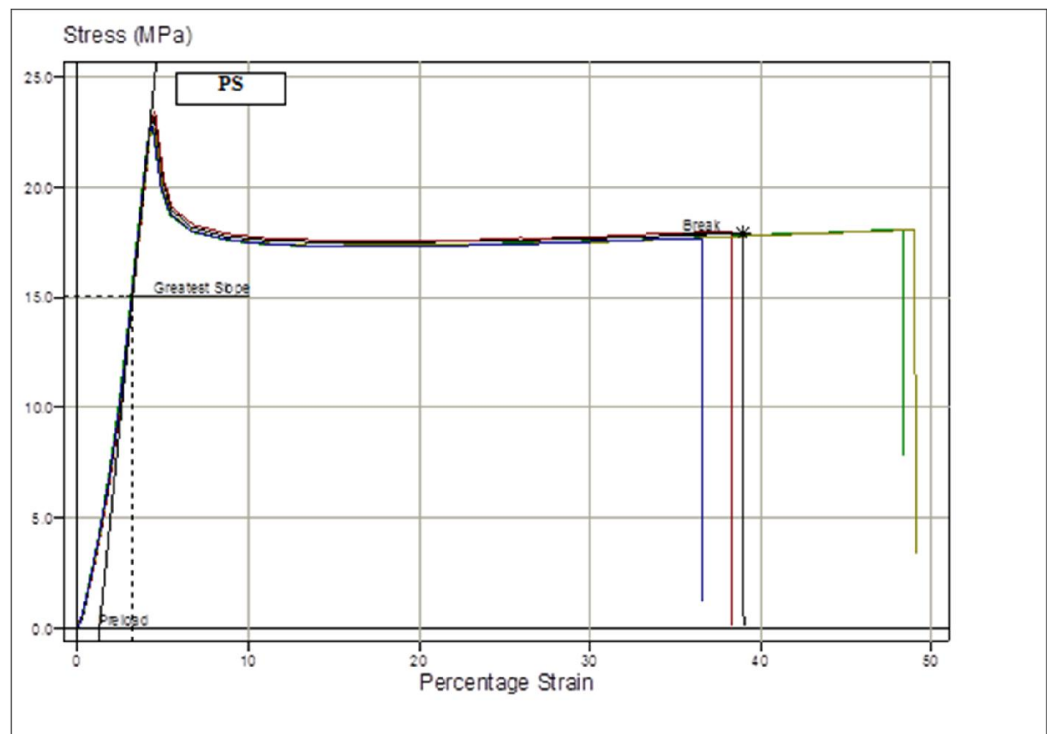
Mekaaniset testit, jotka tehtiin koekappaleille ovat: vetokoe, iskukoe, tiheyden mittaust sekä kovuuden mittaust shore D:llä. Jokaisesta materiaalista on tehty yllä mainitut testit. Mekaanisista testeistä on tehty taulukoita ja tuloksia on purettu auki niiden avulla.

Vetokoe

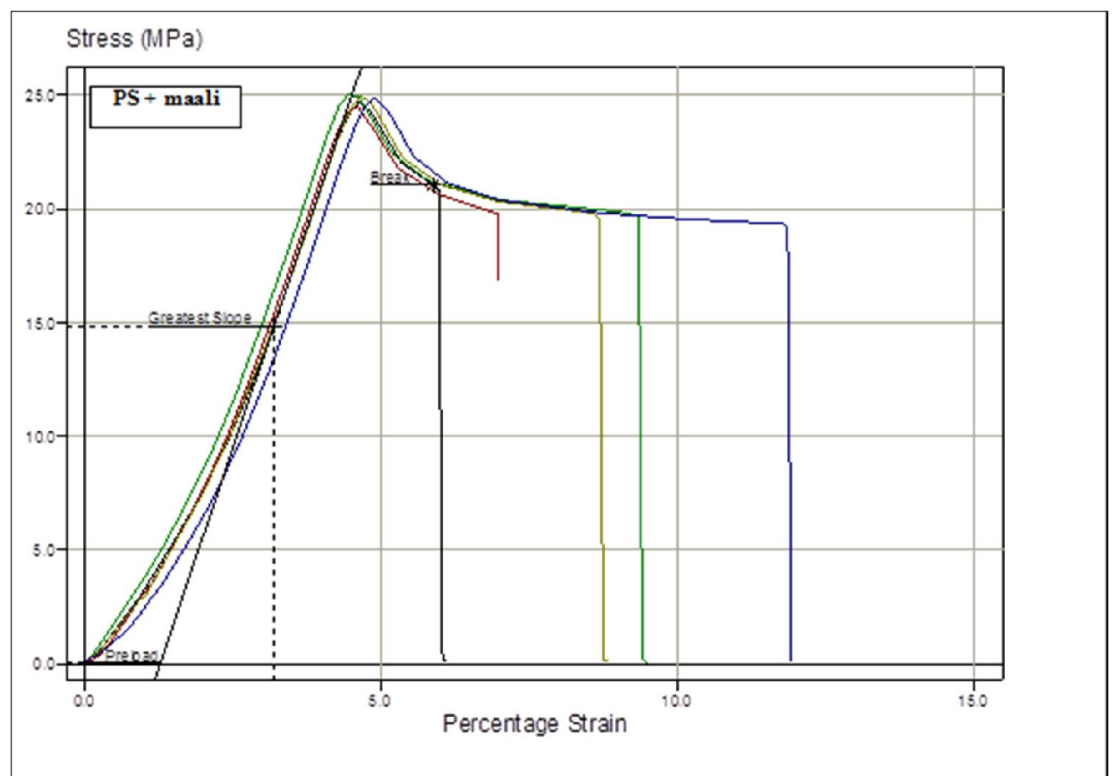
Vetokokeesta saatiin tulokseksi jännitys-venymä-piirrokset, joiden avulla on saatu laskettua vetomoduli, myötölujuus, myötövenymä, murtolujuus ja murtovenymä jokaiselle materiaalille. Jokaisesta materiaalista otettiin 5 mittaustulosta, joiden perusteella on laskettu keskiarvot sekä keskihajonnat.

Alla olevissa taulukoissa 1,2,3,4,5 ja 6 on esitetty jännitysvenymäpiirrokset jokaiselle materiaalille. Y-akselilla on jännitys (stress) megapascalina ja x-akselilla on venymä (strain) prosentteina. Jokaisen materiaalin piirrokset lähtevät ensin loivaan nousuun ja suoristuvat vasta 3-4 %:n kohdilla. Tämä johtuu koekappaleisiin tulleista kohoumista, jotka olivat muodostuneet ruiskuvalussa ulostyöntötapeista. Vetolaitteessa olevat itsekiristyvät leuat saivat pitävän otteen vasta kun kohoumat olivat antaneet periksi ja menneet kasaan.

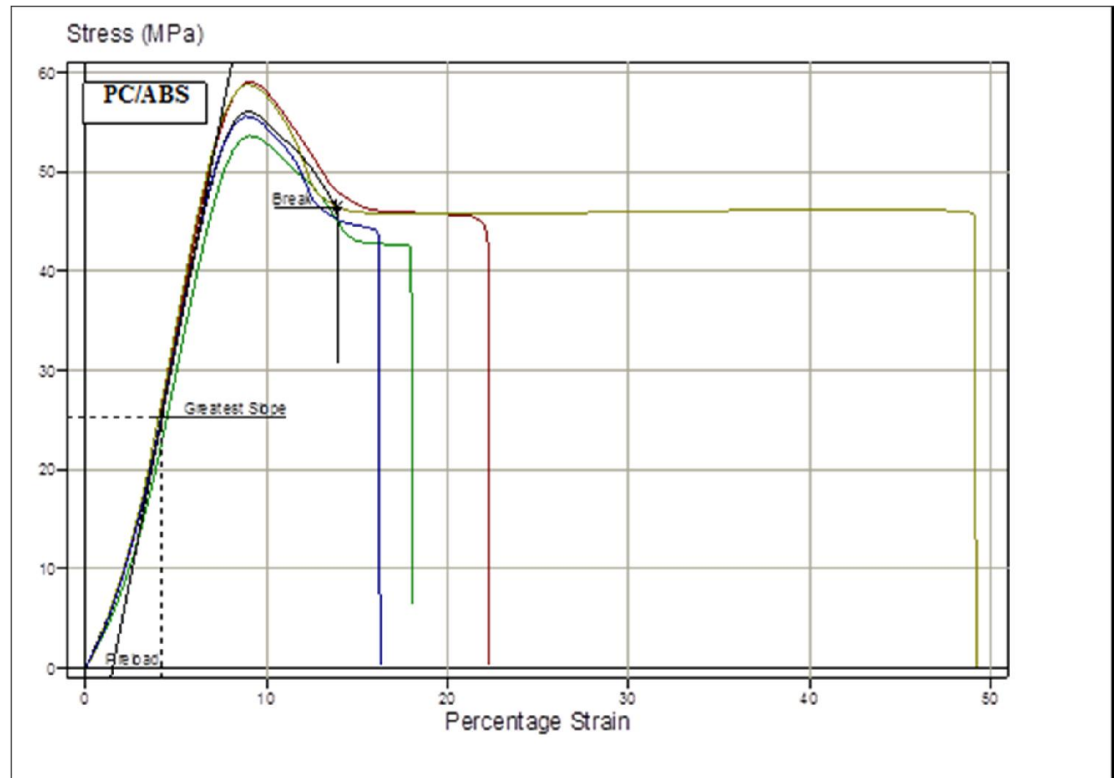
TAULUKKO 1. Jännitysvenymäpiirros PS



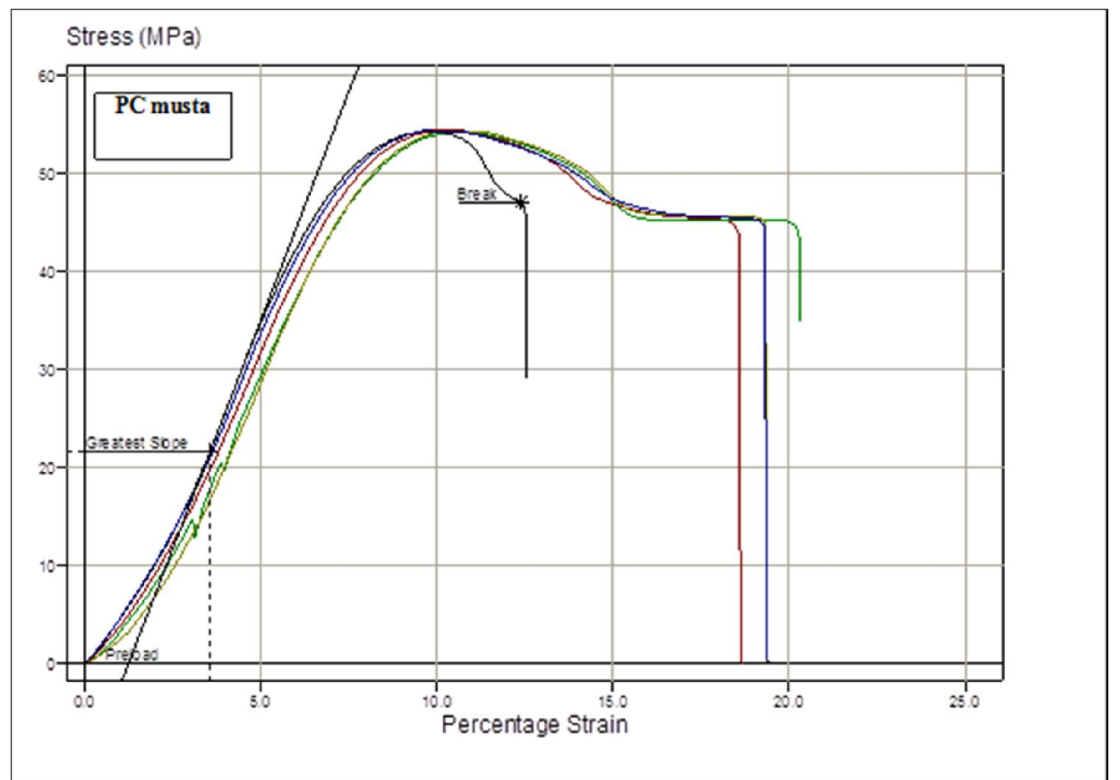
TAULUKKO 2. Jännitysvenymäpiirros PS + maali



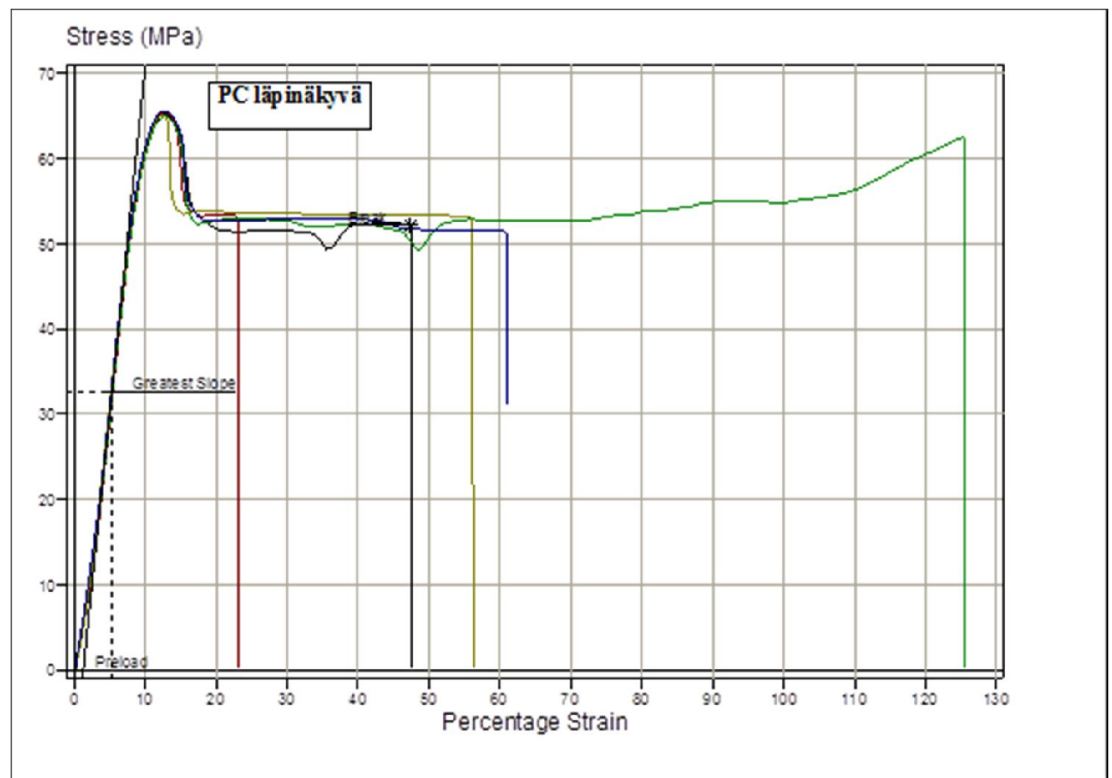
TAULUKKO 3. Jännitysvenymäpiirros PC/ABS



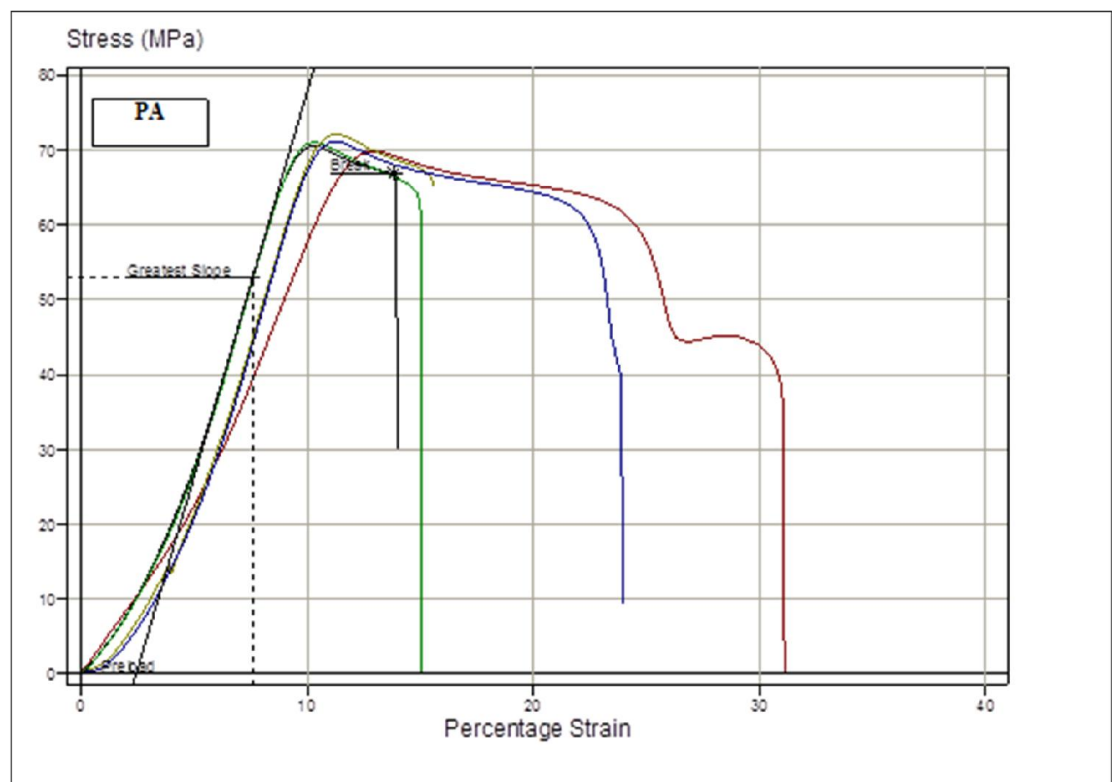
TAULUKKO 4. Jännitysvenymäpiirros PC musta



TAULUKKO 5. Jännitysvenymäpiirros PC läpinäkyvä



TAULUKKO 6. Jännitysvenymäpiirros PA



Jokaisen materiaalin kohdalla jännitysvenymäpiirroksissa nähdään suuri hajonta venymän kohdalla. Erityisesti PC läpinäkyvällä ja PC/ABS:llä yksi koekappaleista on venynyt enemmän kuin muut. Syy tähän voi olla materiaalien sisältämät likapartikkelit tai sulamatta jääneet materiaalin palaset.

TAULUKKO 7. Vetokokeen tulokset

Näyte		Vetomoduli/ kimmokerroin (MPa)	Myötölujuus (MPa)	Myötövenymä (%)	Murtolujuus (MPa)	Murtovenymä (%)
PS	ka.	757,4	23,0	4,7	17,9	42,2
	kh.	12,37	0,23	0,15	0,18	5,97
PS + maali		786,7	24,8	3,7	20,0	8,5
		14,40	0,23	0,12	0,64	2,28
PC/ABS		939,5	56,6	9,0	44,6	23,8
		44,00	2,30	0,11	1,61	14,44
PC musta		938,5	54,5	10,3	45,4	17,9
		101,45	0,13	0,25	0,96	3,13
PC läpinäkyvä		810,5	65,3	12,5	54,3	62,5
		14,39	0,25	0,02	4,59	37,97
PA		991,7	71,0	11,1	58,5	19,6
		124,62	0,86	1,07	11,45	7,26

Taulukossa 7. on kuvaajista saadut arvot sekä kuvaajien avulla lasketut arvot.

Polystyreenin ja maalia sisältäneen polystyreenin tulokset ovat muuten samankaltaisia, mutta murtovenymän kohdalla polystyreenin arvo on viisinkertainen maalia sisältäneeseen polystyreenin verrattuna. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että maalin takia polystyreeni käyttäytyy hauraammin.

Iskukoe

Taulukossa 8. ovat tulokset lovettujen, huoneenlämpöisten koesauvojen iskukokeesta. Keskiarvo ja keskihajonta on laskettu 10 koesauvasta. Kaikkien kappaleiden murtumatyyppi oli C eli complete break, mikä tarkoittaa sitä, että koekappale murtuu kokonaan.

TAULUKKO 8. Iskukoe lovetuilla koekappaleilla

Näyte		Iskulujuus (kJ/m ²)	Murtuma- tyyppi
PS	ka. kh.	5,9 0,11	C
PS + maali		2,1 0,31	C
PC/ABS		19,3 6,79	C
PC musta		9,0 0,57	C
PC läpinäkyvä		7,8 0,44	C
PA		3,9 0,41	C

Taulukossa 9. ovat loveamattomien koesauvojen tulokset jokaisesta materiaalista. Koesauvoja oli pidetty vähintään 16 tuntia -25 °C:ssa. Itse koe tapahtui huoneenlämmössä. Muut materiaalit murtuivat kokonaan, paitsi polykarbonaattia sisältävät. Niiden murtumatyyppi oli N eli nonbreak, mikä tarkoittaa sitä, etteivät koekappaleet murtuneet ollenkaan.

TAULUKKO 9. Iskukoe loveamattomilla koekappaleilla

Näyte		Iskulujuus (kJ/m ²)	Murtuma- tyyppi
PS	ka. kh.	6,2 0,35	C
PS + maali		9,9 1,53	C
PC/ABS		126,7 0,64	N
PC musta		127,0 0,49	N
PC läpinäkyvä		128,4 0,55	N
PA		52,0 18,39	C

Tuloksista huomataan selvä ero pelkän polystyreenin ja maalia sisältäneen polystyreenin välillä. Kummassakin kokeessa polystyreenin iskulujuus on huomattavasti suurempi kuin maalia sisältäneen polystyreenin. Maali selvästi huonontaa materiaalin iskulujuutta eli materiaalista on tullut hauraampaa. Polykarbonaattien välillä ei ole suuria eroja iskulujuudessa.

Tiheyden mittaus

Tiheys on määritelty kahden tuloksen keskiarvona, josta on laskettu myös keskihajonta, jotka näkyvät taulukossa 10. Läpinäkyvä polykarbonaatti on tiheämpää kuin musta polykarbonaatti, ero on $0,025 \text{ g/cm}^3$. Polystyreeneistä maalia sisältävä näyte on tiheämpi, josta voidaan päätellä että maalin tiheys on suurempi kuin polystyreenillä. Ero näiden materiaalien välillä on $0,01 \text{ g/cm}^3$.

TAULUKKO 10. Materiaalien tiheys

Näyte		$\rho \text{ (H}_2\text{O)}$ (g/cm ³)
PS	ka.	1,184
	kh.	0,001
PS + maali		1,194 0,001
PC/ABS		1,192 0,000
PC musta		1,257 0,003
PC läpinäkyvä		1,282 0,001
PA		1,132 0,001

Shore D-kovuus

Kovuus on mitattu jokaisesta näytteestä viidestä kohtaan heti kärjen painaessa koesauvaa eli ajalta 0 sekuntia sekä 15 sekunnin kohdalla. Tuloksista laskettiin keskiarvo sekä keskihajonta, jotka näkyvät taulukossa 11. Tulosten perusteella maalia sisältänyt polystyreeni on hieman kovempaa kuin pelkkä polystyreeni. Maalia sisältänyt polystyreeni on myös tiheämpää, joka selittää eron näiden kahden polystyreenin kovuudessa.

TAULUKKO 11. Shore D-kovuuden tulokset

Näyte		0 s	15 s
PS	ka.	76,6	75,0
	kh.	1,52	1,41
PS + maali		78,0	76,0
		1,23	1,23
PC/ABS		80,0	77,4
		1,58	1,14
PC musta		82,2	81,0
		0,45	0,71
PC läpinäkyvä		83,2	81,8
		0,84	0,84
PA		78,6	76,2
		1,14	0,84

7.2 Palonkesto testit

Taulukossa 12 on palonkesto testin tulokset. Paloluokitus polystyreeneillä sekä polykarbonaateilla on pysynyt samana kuin neutraalisella materiaalilla, eri parhaimmassa luokassa V-0. Tämä tarkoittaa sitä, että yksikään materiaalin viidestä näytteestä ei ole palanut 10 sekuntia pidempään kummallakaan kerralla polttokerralla, sen jälkeen kun polttaminen on lopetettu. Yhteensä liekehtimisaika kaikilla polttokerroilla on alle 50 sekuntia. Lisäksi kappaleesta ei ole voinut tippua liekehtiviä palasia, jotka ovat sytyttäneet alla olevan pumpulitupon.

TAULUKKO 12. Palonkesto testin tulokset

Materiaali	Paloluokitus
PS	V-0
PS+maali	V-0
PC/ABS	V-1
PC musta	V-0
PC kirkas	V-0
PA	ei luokitusta

PC/ABS:llä luokitus huonontui, kokonaisliekehtimisaika oli suurempi kuin sallittu 50 sekuntia, lisäksi joillakin polttokerroilla ylittyi 10 sekunnin palamisaika. PC/ABS:n lisäaineistukselle, ainakin palonkestoaineille on tapahtunut jotain

kierrätyksen yhteydessä, sillä voidaan olettaa että neitseellinen materiaali on kuulunut paloluokituksestaan V-0:n.

Polyamidille ei saatu luokitusta ollenkaan, sillä se tiputti palavaa materiaalia sytyttäen alla olevat pumpulit ja samalla sammuttaen näytteen.

7.3 DSC

DSC:n avulla jokaiselle materiaalille saatiin lasisiirtymislämpötila T_g , lisäksi polyamidille saatiin sulamislämpötila T_m , jotka on esitetty taulukossa 13. Toisin kuin muut materiaalit, polyamidi on osakiteinen, mistä johtuu että sillä on sekä lasisiirtymislämpötila sekä sulamislämpötila. Koska PC/ABS koostuu sekä polykarbonaatista että akryyliniiriili-butadieeni-styreenistä, sillä on kaksi lasisiirtymislämpötilaa: ensimmäinen on ABS:n ja toinen PC:n. DSC:n käyrät löytyvät liitteistä 8-13.

TAULUKKO 13. Lasisiirtymis- sekä sulamislämpötilat näytteille.

Näyte	T_g (°C)	T_m (°C)
PS	92,0	
PS+maali	89,4	
PC/ABS	113,4 ja 168,9	
PC musta	147,1	
PC läpinäkyvä	151,9	
PA	52,8	218,9

7.4 Reologiset mittaukset

Reologiset mittaukset on myös tehty jokaiselle tutkittavalle materiaalille.

Reologisia mittauksia ovat sulaindeksi ja kapillaarireometri. Tuloksia on esitetty taulukoilla ja tuloksia on purettu auki näiden taulukoiden avulla.

Sulaindeksi

Kaikille materiaaleille tehtiin sulaindeksimittaus. Taulukossa 14 parametrit-kohdassa näkyy, mitä painoja sekä mitä lämpötilaa eri materiaaleilla käytettiin.

Mitä suurempi molekyyliä muovi sisältää, sitä pienempi sulamassavirta on. Lisäksi tähän vaikuttaa moolimassajakauma sekä molekyylien hauraus. Kierrätys on luultavasti pilkkonut molekyyliä sekä tehnyt niistä hauraampia.

TAULUKKO 14. MVR ja MFR muoveille

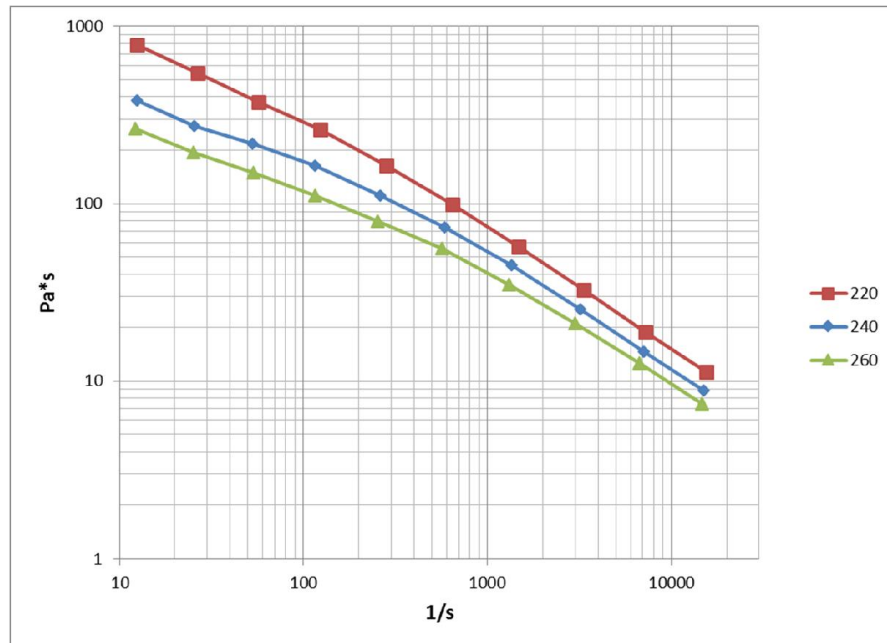
Näyte	MVR (cm ³ /10 min)	kh.	MFR (g/10 min)	Parametrit
PA	45,5	0,43	45,2	230 °C / 2,16 kg
PC musta	23,2	0,26	25,9	300 °C / 1,2 kg
PC kirkas	15,1	0,18	17,3	300 °C / 1,2 kg
PC/ABS	17,1	0,50	18,7	250 °C / 2,16 kg
PS + maali	12,3	0,31	13,6	200 °C / 5 kg
PS	13,1	0,63	16,8	200 °C / 5 kg

Polystyreenien arvot eroavat toisistaan luultavasti maalin takia. Koska maalipartikkelit eivät luultavasti sula 200 °C:ssa, ne saavat muovin virtaamaan hitaammin, jonka takia maalia sisältänyt PS saa paremmat arvot kuin PS, vaikka luultavasti molekyylien haurastumista sekä hajoamista on tapahtunut molemmissa.

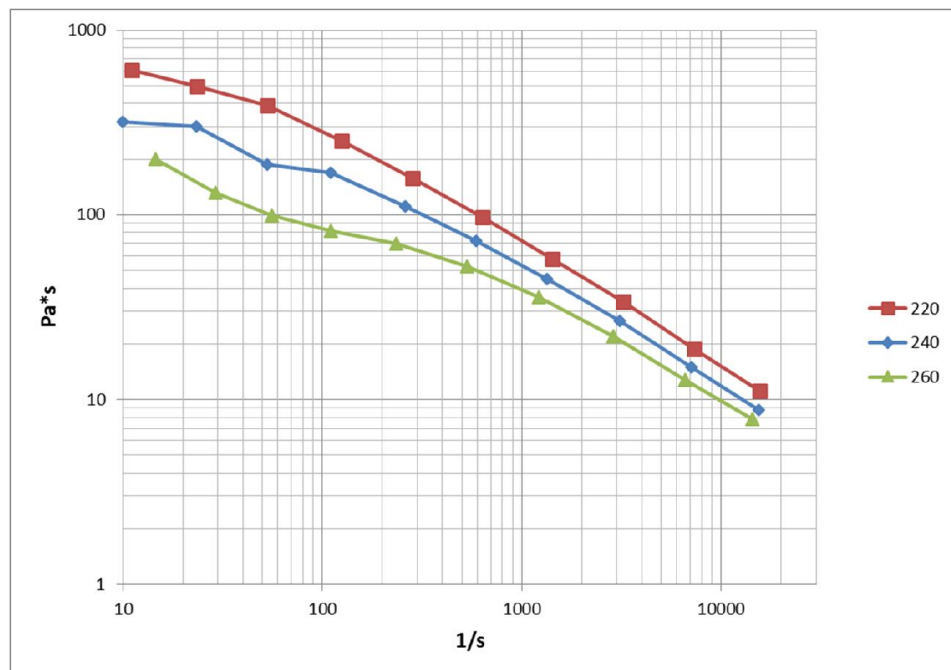
Kapillaarireometri

Alla olevissa taulukoissa 15, 16, 17, 18, 19 ja 20 näkyy viskositeettikuvaajat jokaiselle materiaalille. Kuvaajan pystyakselilla on leikkausviskositeetti (Pa*s) ja vaakaa-akselilla on leikkausnopeus (1/s). Jokainen materiaali on tutkittu kolmessa eri lämpötilassa.

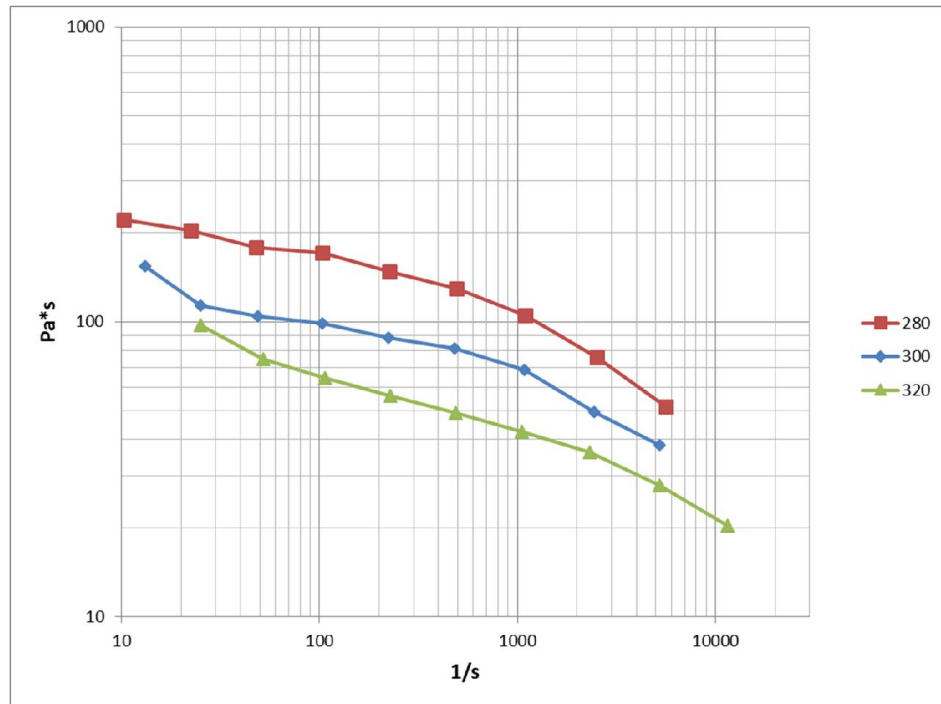
TAULUKKO 15. Viskositeettikuvaaja PS



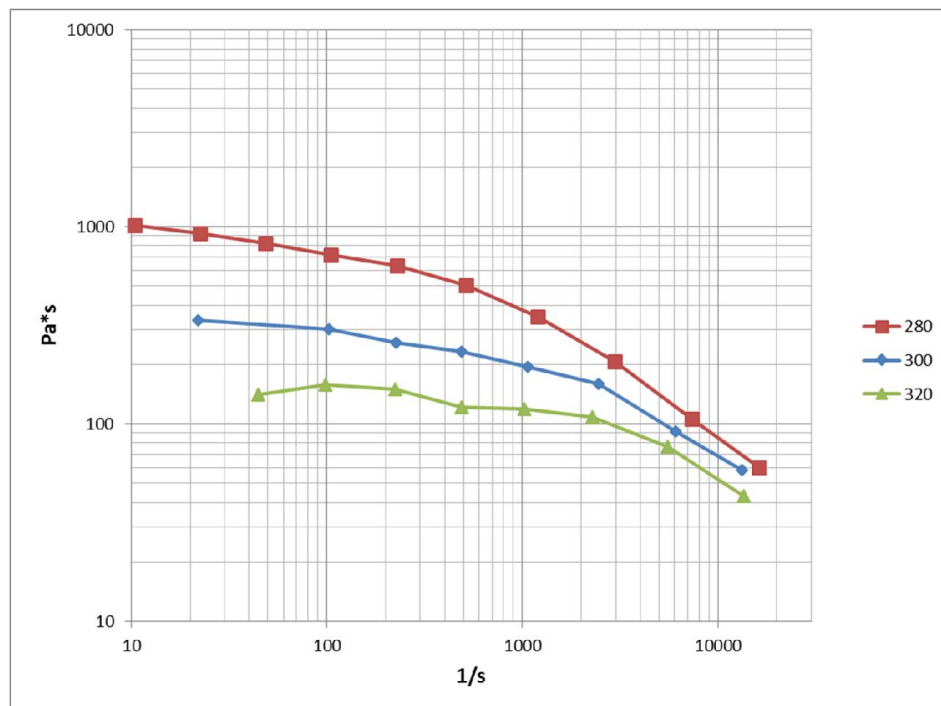
TAULUKKO 16. Viskositeettikuvaaja PS + maali



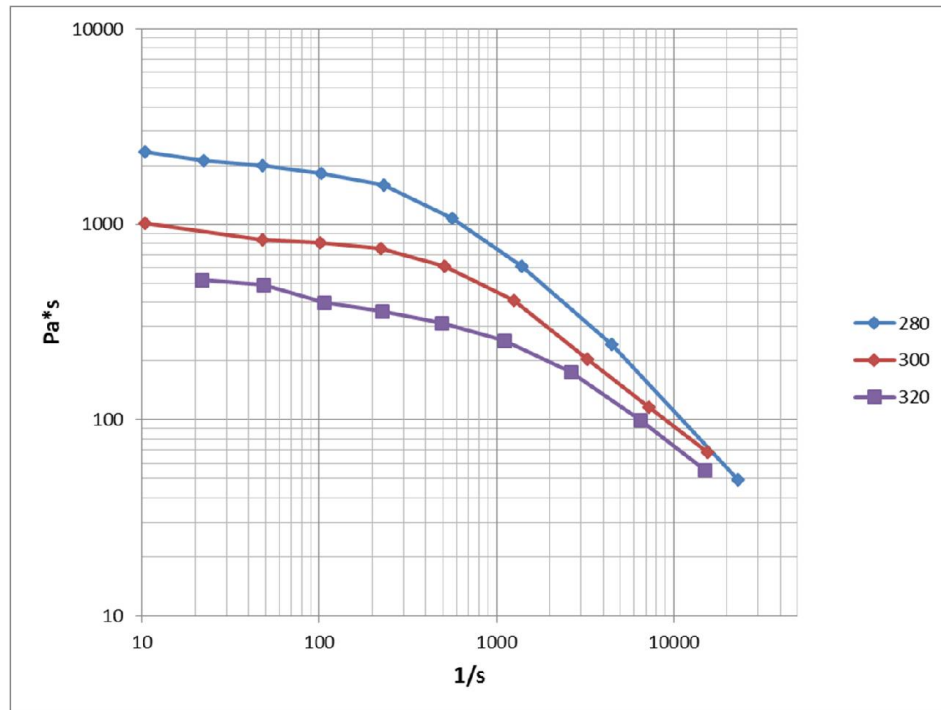
TAULUKKO 17. Viskositeettikuvaaja PC/ABS



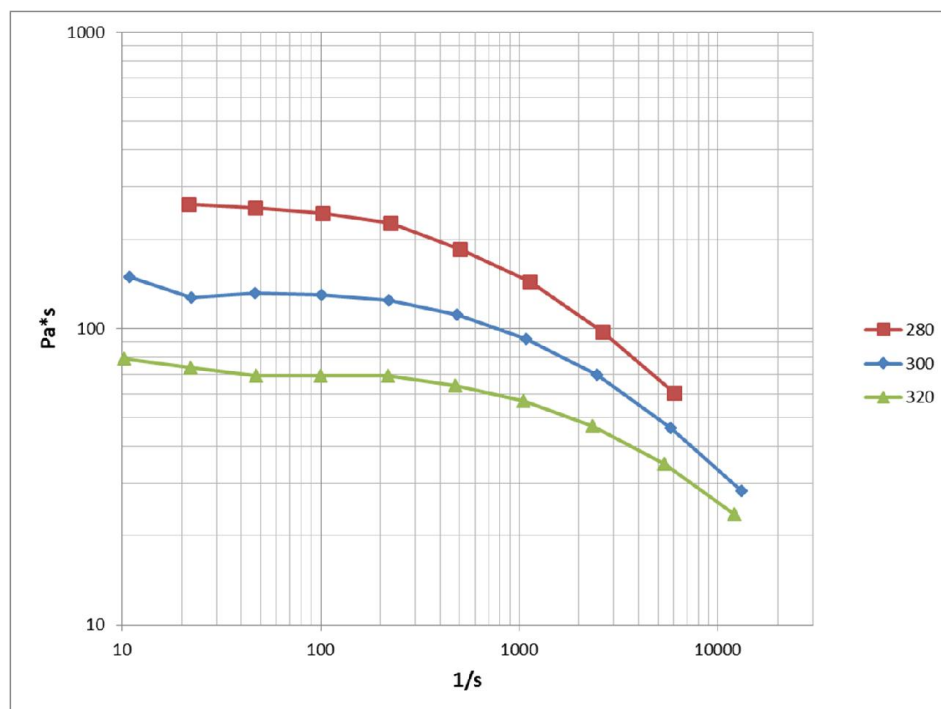
TAULUKKO 18. Viskositeettikuvaaja musta PC



TAULUKKO 19. Viskositeettikuvaaja läpinäkyvä PC



TAULUKKO 20. Viskositeettikuvaaja PA



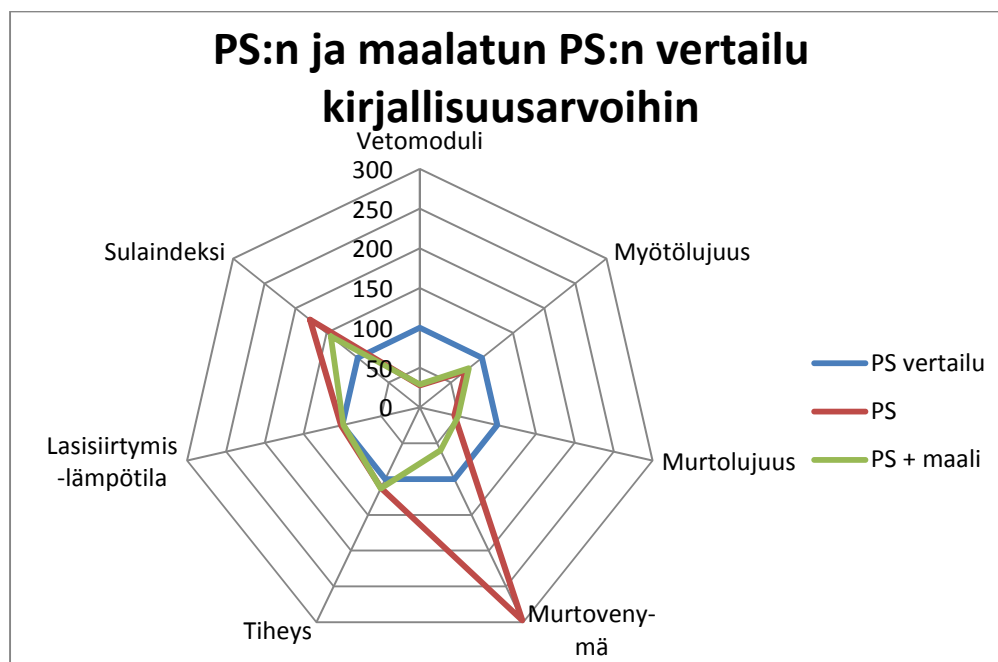
7.5 Tulosten vertailu neutseelliseen materiaaliin

Jotta saadaan jotain kuvaa siitä, miten kierrätys on vaikuttanut materiaalien ominaisuuksiin, on niitä hyvä vertailla neutseellisiin materiaaleihin. Ideaali tilanne olisi, jos saisi dataa samasta neutseellisestä materiaalista, josta kierrätetty tuote on valmistettu. Tämä ei ollut mahdollista taajuusmuuttajan materiaalien kohdalla, joten vertailuarvo on saatu Matwebistä. Usealle muovilajikkeelle on tehty Matwebissä overview-sivu, johon on laskettu matwebistä löytyvästä datasta keskiarvot usealle suurelle. Näitä keskiarvoja on käytetty hämähäkkikuviossa vertailumateriaalina.

7.5.1 PS ja PS + maali

Vertailuarvot on saatu Matwebistä lujittamattomista ja ruiskuvaletuista polystyreeneistä. Taulukossa 21 on vertailussa ollut sekä PS että maalattu PS.

TAULUKKO 21. Hämähäkkikuvio PS ja maalattu PS (Overview of materials for Polystyrene, Molded, Unreinforced 2014)



Ainoat erot casen polystyreenien välillä näkyvät murtovenymässä sekä sulaindeksissä. PS:n murtovenymä on yli kolminkertainen verrattuna vertailuarvoon sekä maalattuun polystyreeniin. Koska materiaaleilla on noin suuri

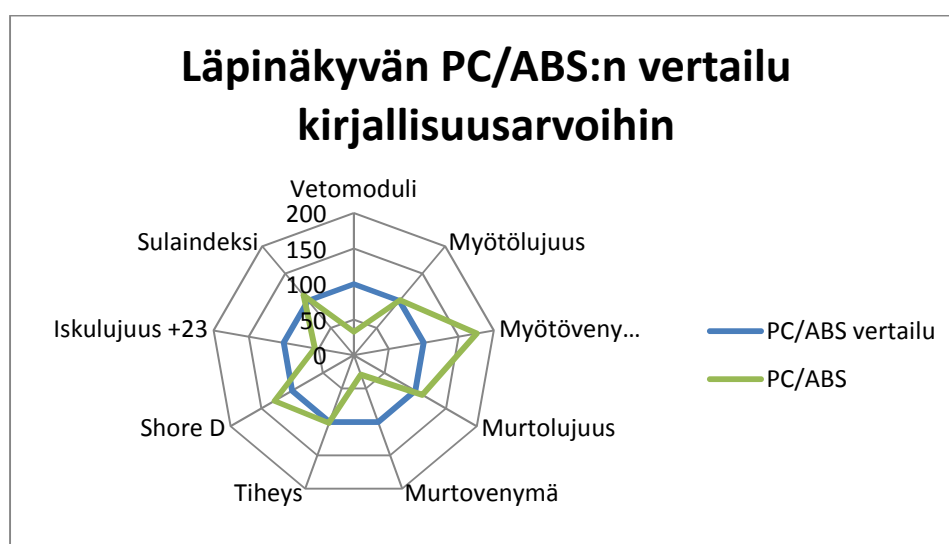
muutos murtovenymässä, voi se jopa viitata siihen että polystyreenit olisivatkin eri materiaalia tai että pelkkää polystyreeniä olisi lisääineistettu erilailla.

Vetomoduli, myötölujuus sekä murtolujuus sen sijaan ovat huomattavasti pienemmät kuin vertailu materiaalilla, joka kertoo kierrätyksen vaikutuksesta mekaanisiin ominaisuuksiin. Lasiinsiirtymislämpötila sekä tiheys ovat suunnilleen samat.

7.5.2 PC/ABS

Vertailuarvot on saatu Matwebistä lujittamattomista PC/ABS seoksista.

TAULUKKO 22. Hämähäkkikuvio PC/ABS (Overview of materials for Polycarbonate/ABS Alloy, Unreinforced 2014)

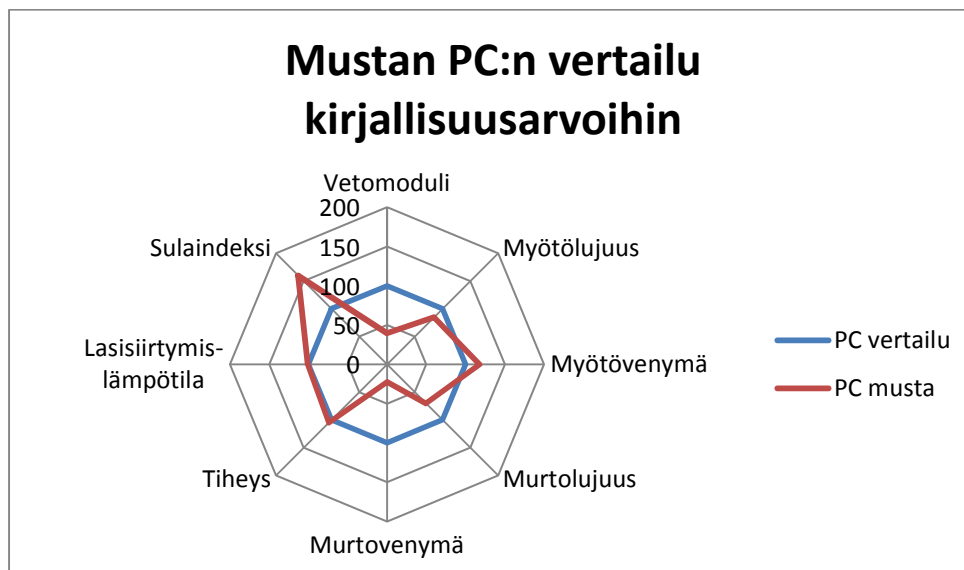


Kuten taulukosta 22 näkyy, vetomoduli ja murtovenymä ovat huomattavasti huonommat kuin vertailumateriaaleilla.

7.5.3 PC musta

Vertailuarvot ovat saatu Matwebistä lujittamattomista ja ruiskuvaletuista polykarbonaateista. Tulokset on esitetty taulukossa 23.

TAULUKKO 23. Hämähäkkikuvio PC musta (Overview of materials for Polycarbonate, Molded 2014)

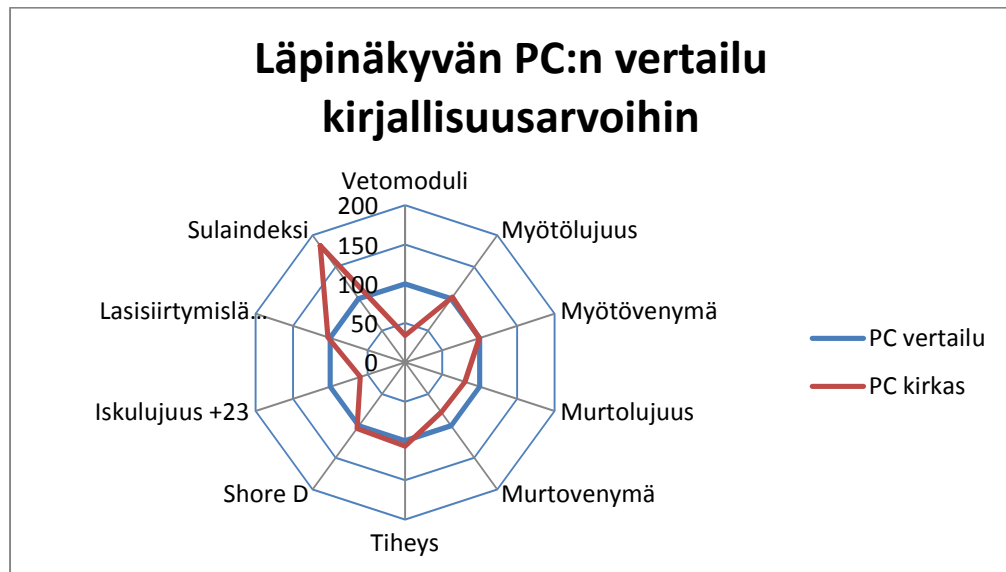


Mekaaniset ominaisuudet ovat tässäkin tapauksessa heikentyneet kierrätetyllä materiaalilla. Vetomoduli sekä murtovenymä on huomattavasti pienempi kuin vertailumateriaalilla, myötölujuus ja murtolujuus ovat laskeneet hieman, kun taas myötövenymä on hieman suurempi kuin vertailumateriaalilla. Lasisiirtymislämpötila sekä tiheys ovat säilyneet samana. Sulaindeksi on taas oletetusti suurempi katkenneiden molekyölien takia.

7.5.4 PC läpinäkyvä

Vertailuarvot ovat saatu Matwebistä lujittamattomista ja ekstruuderilla tuotetuista polycarbonaateista. Hämähäkkikuvio on esitetty taulukossa 24.

TAULUKKO 24. Hämähäkkikuvio PC läpinäkyvä (Overview of materials for Polycarbonate, Extruded 2014)

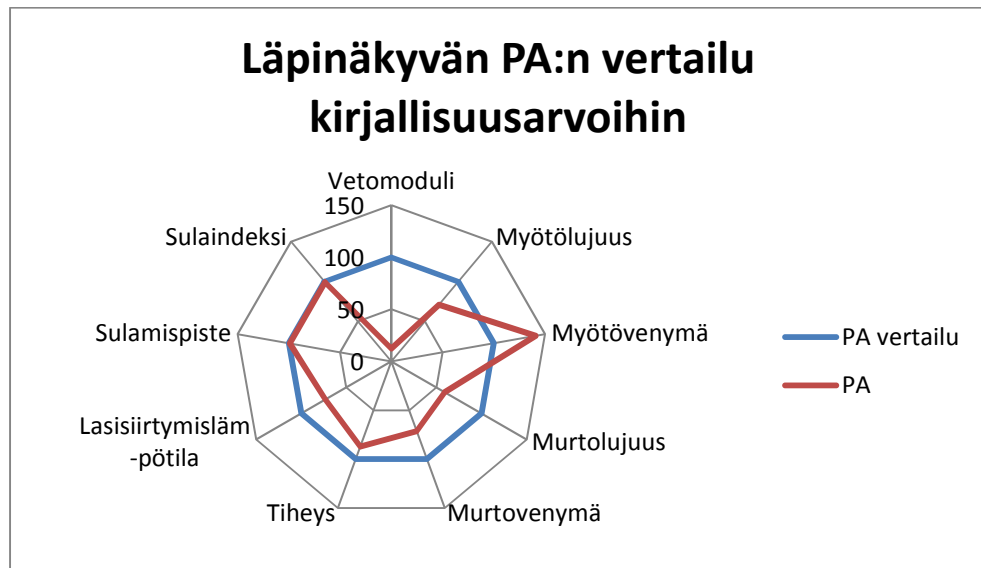


Vetomoduli on jälleen laskenut kierrätetyllä materiaalilla, mutta myötölujuus, myötövenymä, murtolujuus sekä murtovenymä ovat lähes samat kuin vertailukohteilla. Iskulujuus sen sijaan on laskenut huomattavasti ja sulaindeksi on noussut lähes kaksinkertaiseksi. Tiheys ja lasisiirtymislämpötila ovat säilyneet kuten muillakin materiaaleilla.

7.5.5 PA

Polyamidista ei selvinnyt varmasti onko se PA 610 vai PA 612. Kun vertailtiin lasisiirtymis- sekä sulamislämpötilaa, päädyttiin että ne ovat lähempänä PA 610. Vertailuarvot ovat siis ruiskuvaletuista ja lujittamattomista PA 610 arvoista. Hämähäkkikuvio on esitetty taulukossa 25.

TAULUKKO 25. Hämähäkkikuvio PA (Overview of materials for Nylon 610 2014)



Vetomoduli on jälleen huomattavan paljon pienempi. Lisäksi myötölujuus, murtolujuus sekä murtovenymä ovat pienempiä. Sen sijaan myötövenymä on jälleen hieman suurempi kuin vertailumateriaaleilla.

8 YHTEENVETO

Työn teoriaosuus keskittyi käymään läpi muovien kierrätyksen vaiheita, aina käytetystä muovisesta tuotteesta uudeksi materiaaliksi. Myös taajuusmuuttajan muoviosat kävivät läpi kaikki kierrätyksen vaiheet erottelusta pesuun ja kuivaukseen. Tosin vaiheet eivät olleet yhtä tehokkaita kuin teollisuudessa, sillä erottelu tapahtui manuaalisesti käsin ja pesu tavallisessa pesukoneessa.

Taajuusmuuttajasta saadut muovit jaettiin kuuteen tutkittavaan materiaaliin (PS, maalia sisältävä PS, musta PC, ja läpinäkyvä PC, PC/ABS sekä PA). Näistä saadut rouheet ajettiin koesauvoiksi, joille tehtiin erilaisia mekaanisia testejä (veto- ja isku- ja kovuuskokeet), tiheyden mittaukset sekä palonkestotesti. Rouheet ajettiin DSC:llä sekä kapillaarireometrillä ja lisäksi mitattiin sulaindeksit.

Tuloksia käytiin läpi vertaillen polystyreeniä sekä maalia sisältänyttä polystyreeniä toisiinsa, jolloin nähtiin, miten muut partikkelit materiaalissa vaikuttavat sen ominaisuuksiin. Lisäksi vertailtiin materiaaleja kirjallisuusarvoihin. Lähes jokaisella materiaalilla vetomoduli on laskenut huomattavasti ja sulaindeksi on taas noussut. Sulaindeksin nouseminen kertoo materiaalin molekyyliarakenteiden katkeilemista, mikä on normaalia kierrätetyille materiaaleille. Usealla materiaalilla oli laskenut iskulujuus sekä murtovenymä, mitkä viittaavat materiaalien haurastumiseen.

Taajuusmuuttajan materiaalit ovat olleet useita vuosia käytössä erilaisissa olosuhteissa, joten niiden laatu on ymmärrettävästi kärsinyt. Koska pesu suoritettiin yksinkertaisesti vain vesipesulle, on materiaaleihin jäänyt erilaisia kontaminaatioita, jotka ovat osaltaan vaikuttaneet heikentävästi testattujen muovien ominaisuuksiin. Luultavasti tarkemmalla pesulla sekä lisäaineistamalla materiaalit, olisi päästy ominaisuuksien osalta lähemmäs neitseellistä materiaalia, jota käsitellään projektin jatkossa.

Projekti siis jatkuu siten, että taajuusmuuttajan osaa muoveista koitetaan modifioida lisäaineistuksella tiettyä käyttökohdetta silmällä pitäen.

LÄHTEET

Alibaba. 2013. [viitattu 20.11.2013]. Saatavissa:

<http://www.alibaba.com/showroom/plastic-friction-washer.html>

Besland, L., Klink, G., Rouilloux, G. & Weill, D. 2012. Plastics The Future for Automakers and Chemical Companies [verkkojulkaisu]. A.T. Kearney, Inc [viitattu 20.10.2013]. Saatavissa:

<http://www.atkearney.com/documents/10192/28dcce52-affb-4c0b-9713-a2a57b9d753e>

Biddle, M. 2011. Plastics recycler [verkkojulkaisu]. TED Conferences, LLC

[viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: http://www.ted.com/talks/lang/fi/mike_biddle.html

Brandrup, J. 1996. Recycling and recovery of plastics. Germany: Carl Hansen Verlag

Delgado, C. & Stenmark, Å. 2005. Technological Reference Paper on Recycling Plastics [verkkojulkaisu]. European Virtual Institute for Recycling - VERC [viitattu 10.8.2013]. Saatavissa:

[http://www.wastexchange.co.uk/documenti/H%20_Medio_Ambiente_PROYECT PR_Z5008_verc_clara_WP2_refpaper_Refpaper_plastic_v2.pdf](http://www.wastexchange.co.uk/documenti/H%20_Medio_Ambiente_PROYECT_PR_Z5008_verc_clara_WP2_refpaper_Refpaper_plastic_v2.pdf)

Eerola, S. 2005. Muovien kierrätystä ja uusiokäyttöä ohjaava lainsäädäntö Suomessa ja EU:ssa [verkkojulkaisu]. RePlast FinEst-hanke [viitattu 10.1.2014]. Saatavissa: http://www.palmenia.helsinki.fi/replastfinest/ws1/Sauli_Eerola.pdf

Froth flotation [verkkojulkaisu]. Wikipedia [viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Froth_flotation

Hiltunen, R. 2013. Rautamalmin rikastus. Kemianteekniikan kandidaatintyö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta.

Huyhua, S. 2011. Recycling plastics: New recycling technology and biodegradable polymer development [verkkojulkaisu]. Illumin [viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: <https://illumin.usc.edu/7/recycling-plastics-new-recycling-technology-and-biodegradable-polymer-development/1/>

Kodin muovipakkausten keräyskokeilu [verkkojulkaisu]. Pirkanmaan Jätehuolto Oy [viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: <http://www.pirkanmaan-jatehuolto.fi/pjoy/muovipakkaukset>

Koleva, M. Polystyreeni (PS) [verkkojulkaisu]. Technical University of Gabrovo [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf

Kyparissakos, J. 2012. Ei-invasiiviset verensokerimittausmenetelmät. Insiöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikan koulutusohjelma

La Mantia, F. 2002. Handbook of plastics recycling. UK: Rapra Technology Limited

Nykänen, S. Polyamidit (PA) [verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PA_FI.pdf

Nykänen, S. Polykarbonaatti (PC) [verkkojulkaisu]. Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PC_FI.pdf

Muovi matkalla kaatopaikoilta polttolaitoksiin [verkkojulkaisu]. Yle [viitattu 3.12.2013]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/muovi_matkalla_kaatopaikoilta_polttolaitoksiin/5578898

Muovien kierrätys [verkkojulkaisu]. Muoviteollisuus ry [viitattu: 3.12.2013]. Saatavissa: http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/muovien_kierratys/

Muovien luokitus [verkkojulkaisu]. Muoviteollisuus ry [viitattu: 6.6.2013]. Saatavissa: http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/

Overview of materials for Overview of materials for Nylon 610[verkkojulkaisu]. MatWeb, LLC [viitattu 1.2.2014]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e7193242a22843fc9d7076bf5dbe18e4>

Overview of materials for Polycarbonate, Extruded [verkkojulkaisu]. MatWeb, LLC [viitattu 1.2.2014]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=501acbb63cbc4f748faa7490884cdbca>

Overview of materials for Polycarbonate, Molded [verkkojulkaisu]. MatWeb, LLC [viitattu 1.2.2014]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84b257896b674f93a39596d00d999d77>

Overview of materials for Polycarbonate/ABS Alloy, Unreinforced [verkkojulkaisu]. MatWeb, LLC [viitattu 1.2.2014]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d16a64a389df424f8e53ed481e77477b>

Overview of materials for Overview of materials for Polystyrene, Molded, Unreinforced [verkkojulkaisu]. MatWeb, LLC [viitattu 1.2.2014]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=df6b1ef50ce84e7995bdd1f6fd1b04c9>

Panchal. 2013. [viitattu:20.11.2013]. Saatavissa: <http://www.panchal-plastic.com/>

PC/ABS – polykarbonaatti/akryylnitriili-butadieeni-styreeni [verkkojulkaisu].

Resinex group [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa:

<http://www.resinex.fi/polymeerilaatuja/pc-abs.html>

2011. Maatalouden kalvomuovijätteen hyötykäyttövaihtoehdot Kinnula-

Pihtipudas-Viitasaari-alueella [verkkojulkaisu]. Ekokem [viitattu 25.6.2013].

Saatavissa: <http://www.viisaankivi.fi/filebank/12332-Loppuraportinliitteet.pdf>

Poropudas, M. 2011. Polyvinyylikloridin (PVC) kierrätys ja uusiokäyttö.

Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaaliteknikan koulutusohjelma.

Scheirs, J. 1998. Polymer recycling. UK: John Wiley and sons Ltd.

Seppälä, J. 2008. Polymeeriteknologian perusteet. Helsinki: Hakapaino oy.

Thiele, U.K. 2007. Polyester Bottle Resins. Production, processing, properties and recycling. Germany: Heidelberg business media GmbH.

LIITTEET

LIITE 1. MATERIAALIEN PUNNITUSTULOS

LIITE 2. FTIR PS

LIITE 3. FTIR MAALATTU PS

LIITE 4. FTIR PC/ABS

LIITE 5. FTIR MUSTA PC

LIITE 6. FTIR LÄPINÄKYVÄ PC

LIITE 7. FTIR PA

LIITE 8. DSC PS

LIITE 9. DSC MAALATTU PS

LIITE 10. DSC PC/ABsd

LIITE 11. DSC MUSTA PC

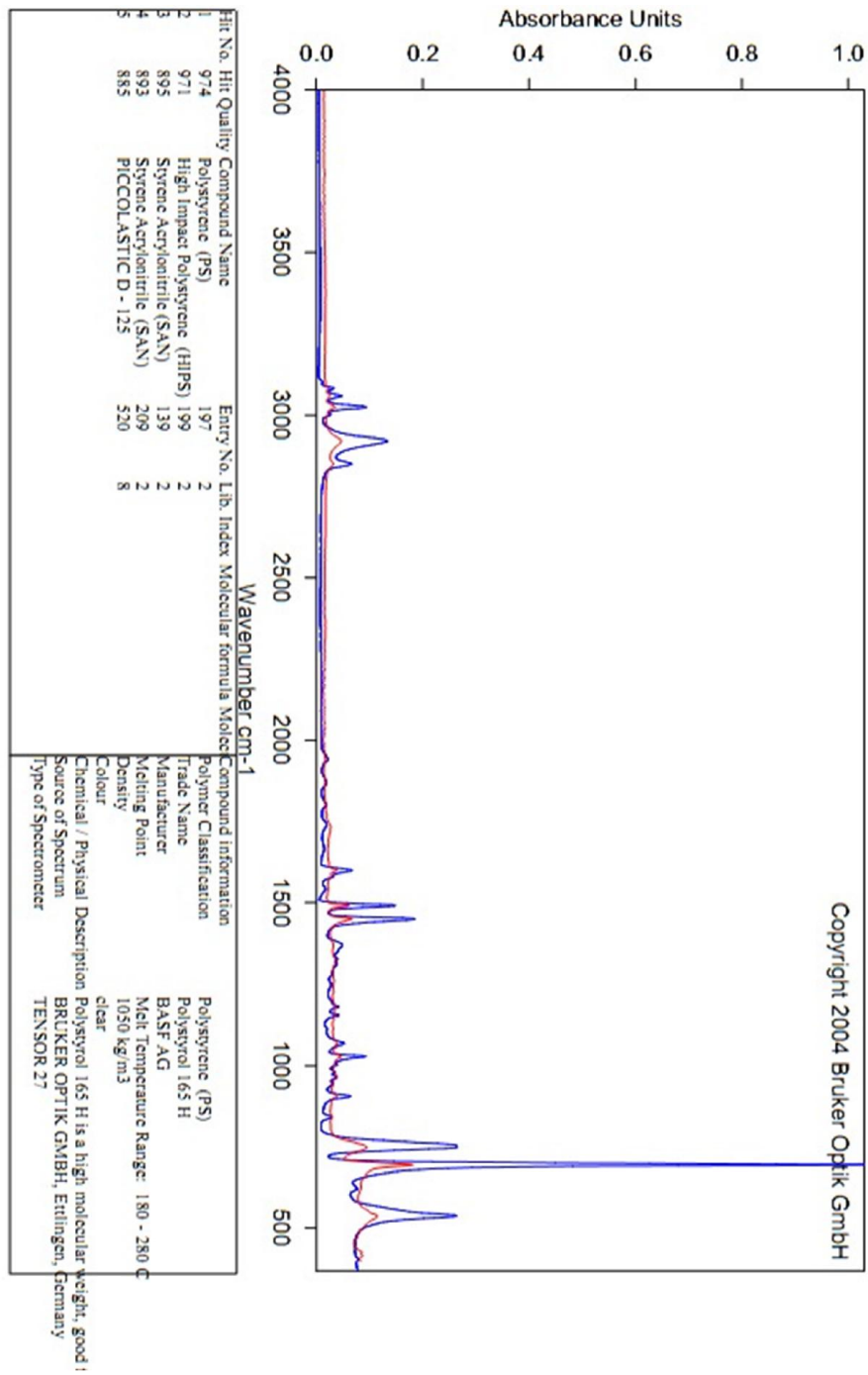
LIITE 12. DSC LÄPINÄKYVÄ PC

LIITE 13. DSC PA

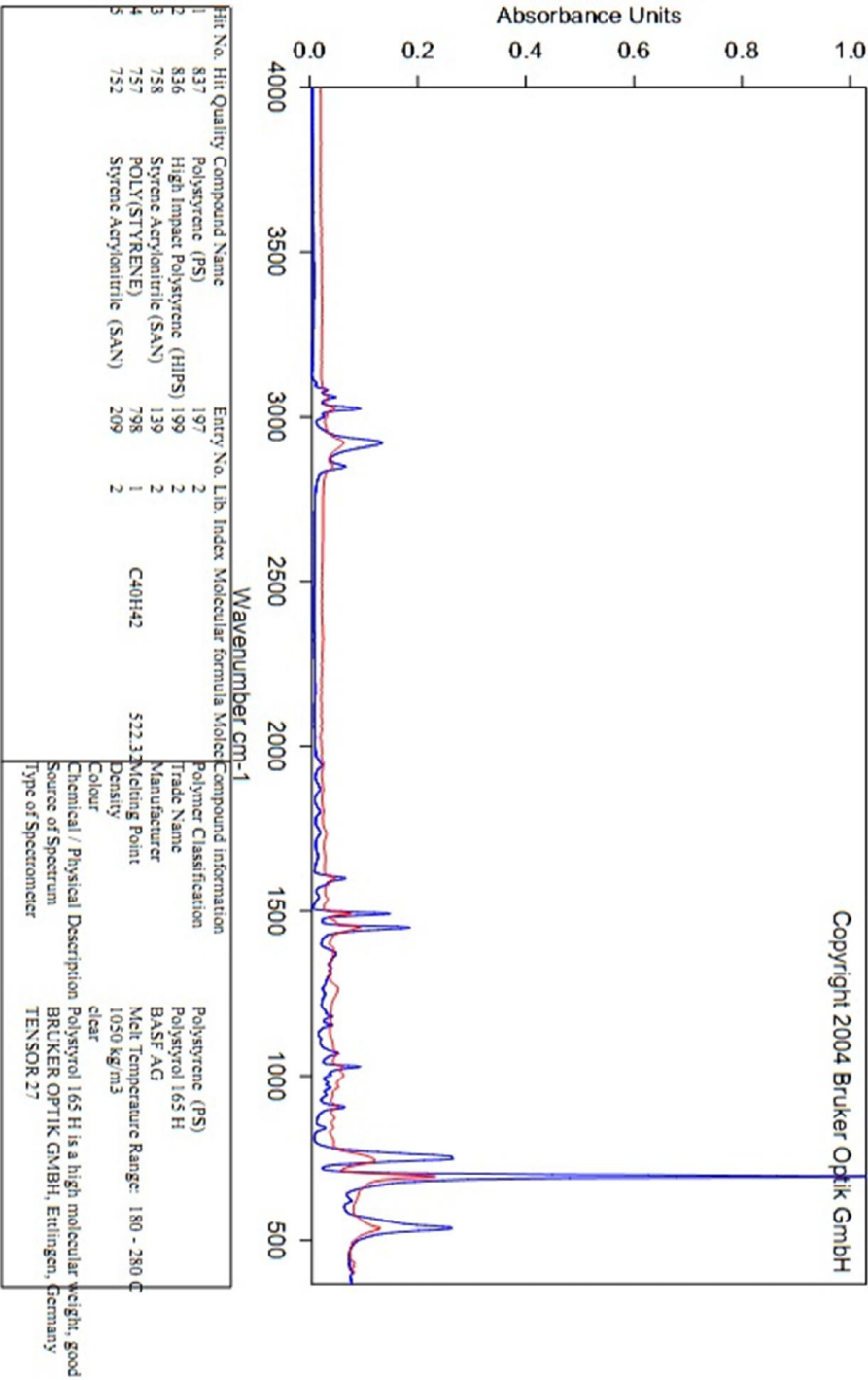
LIITE 1. MATERIAALIEN PUNNITUSTULOS

Rouheet	massa (g)
PC musta	5626
PC/ABS	7101
PS+kuparimaali	7640
PS	2500
PC kirkas	5734
PA	10332

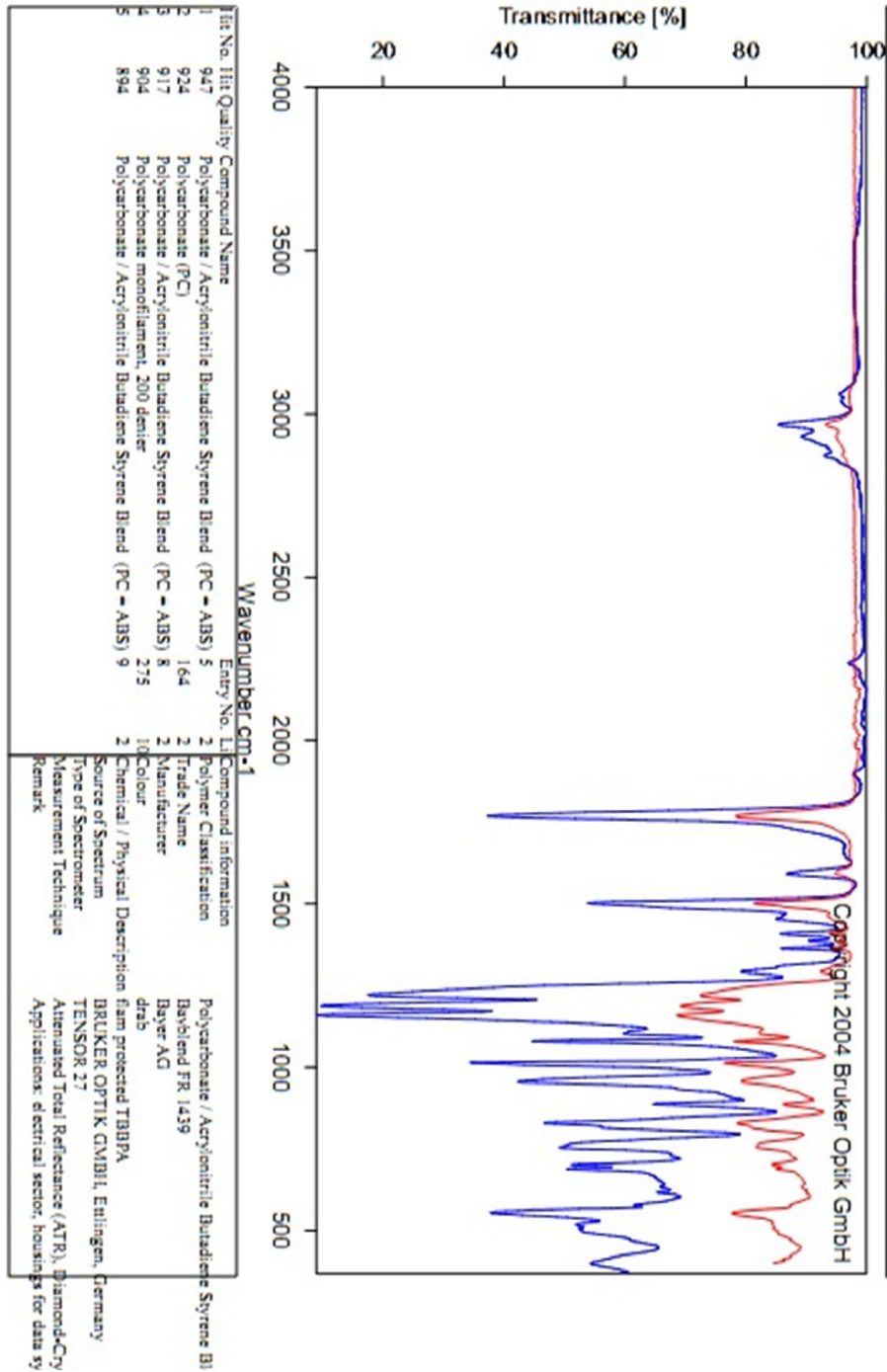
LIITE 2. FTIR PS



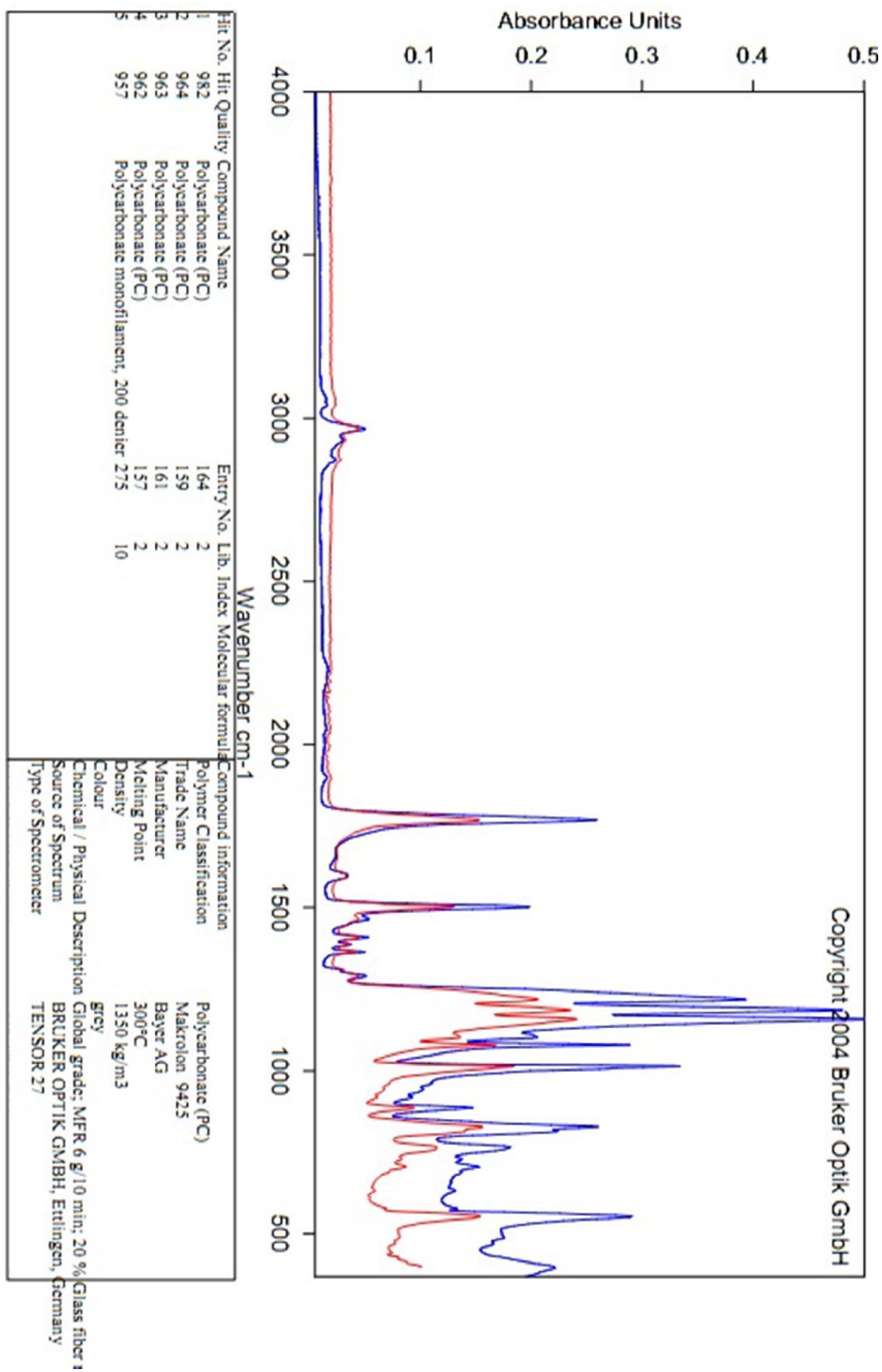
LIITE 3. FTIR MAALATTU PS



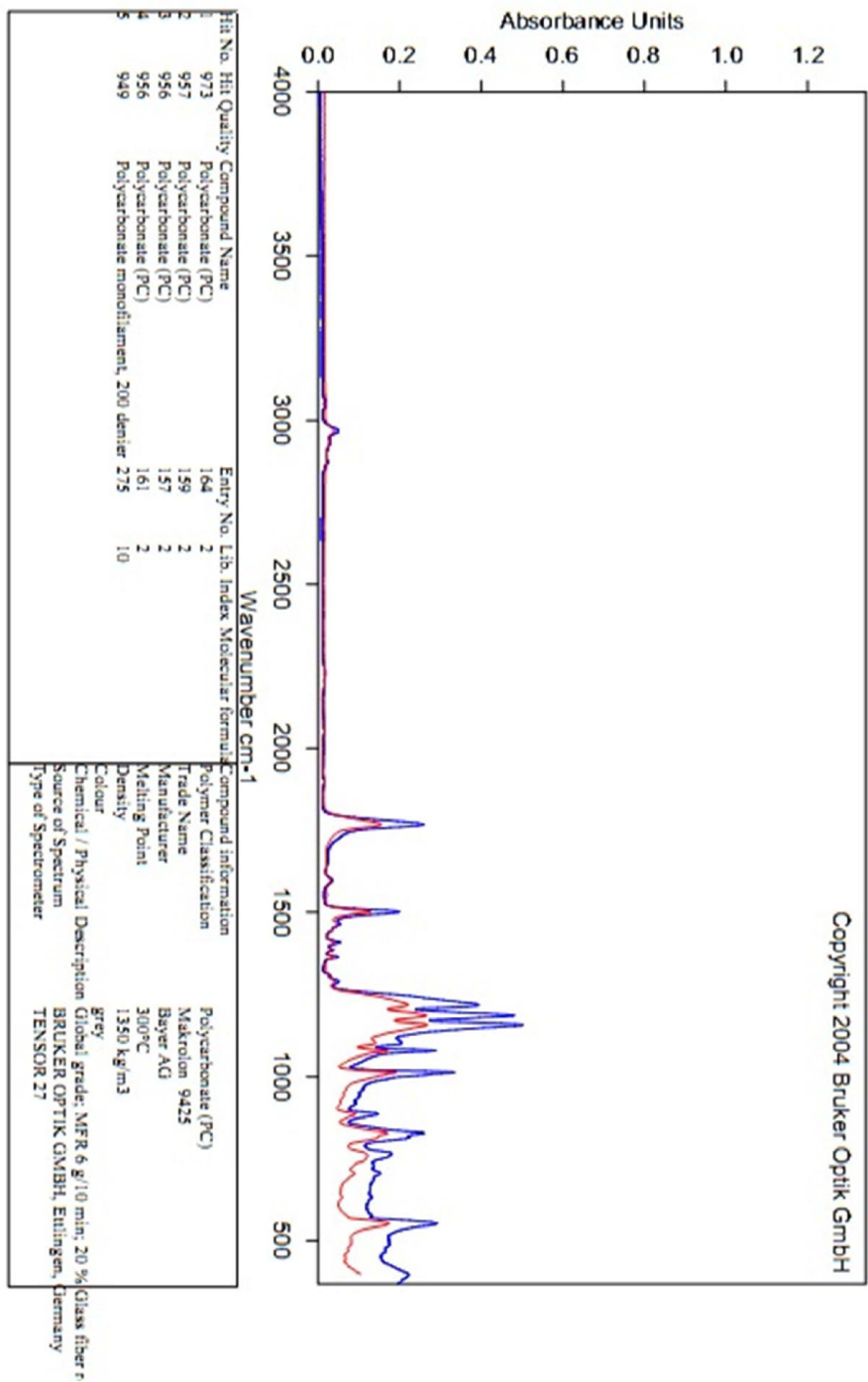
LIITE 4. FTIR PC/ABS



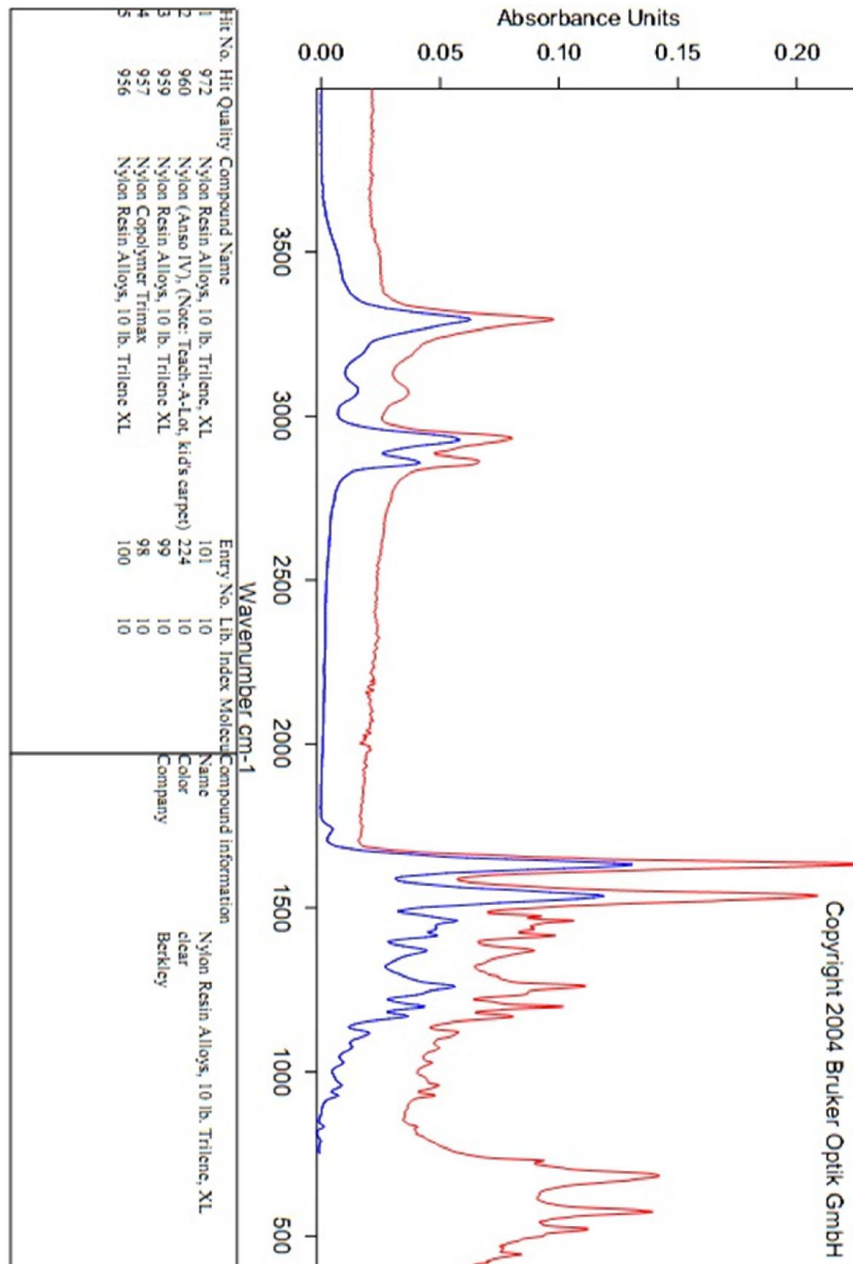
LIITE 5. FTIR MUSTA PC



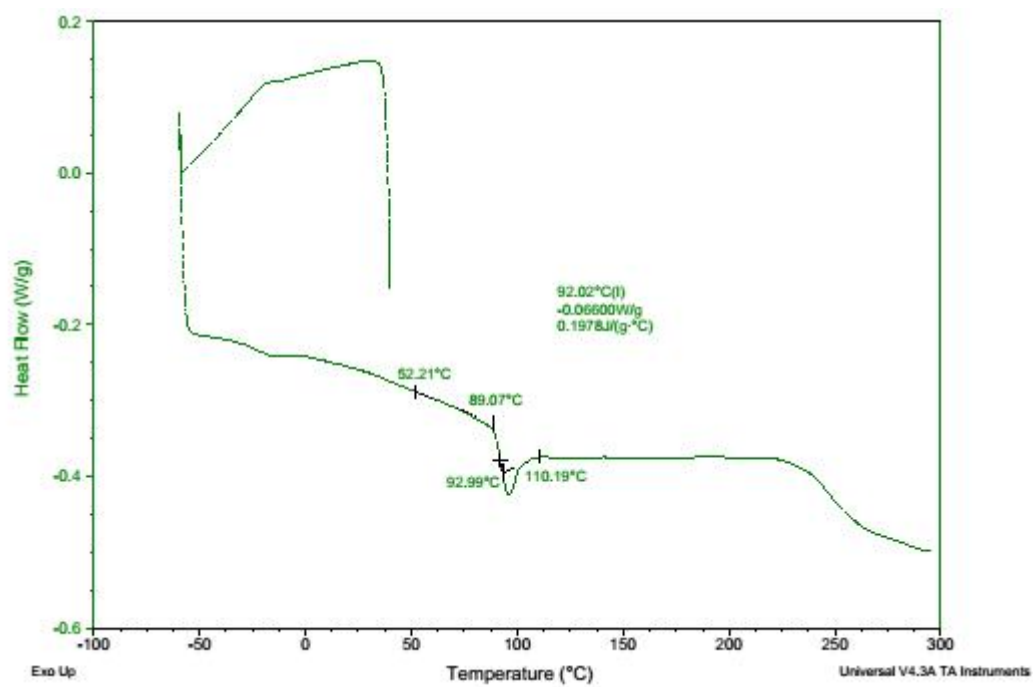
LIITE 6. FTIR LÄPINÄKYVÄ PC



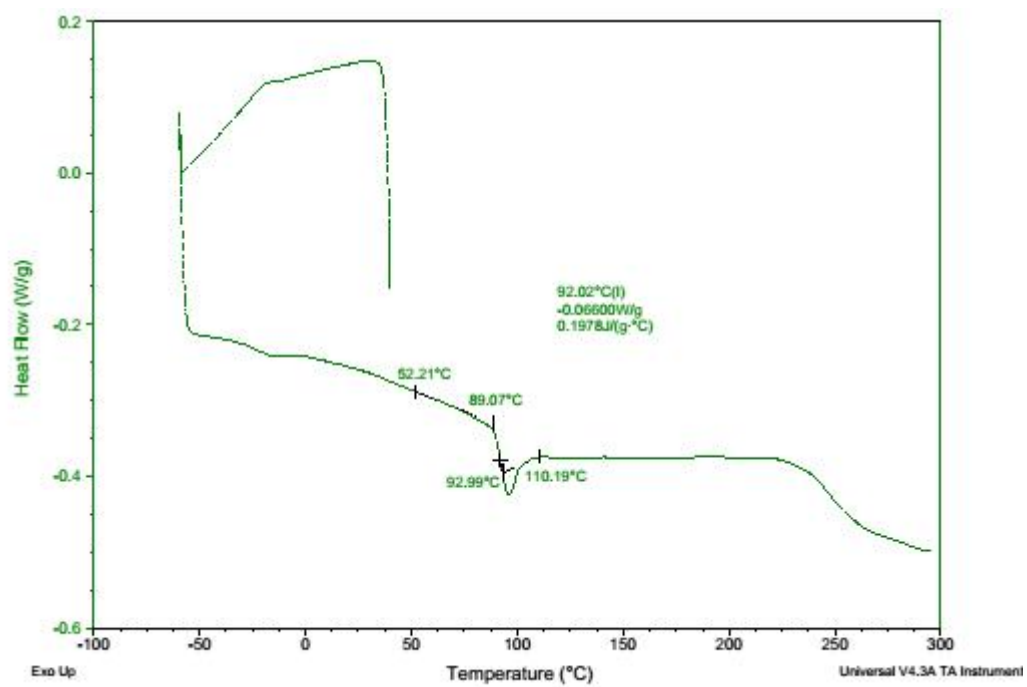
LIITE 7. FTIR PA



LIITE 8. DSC PS



LIITE 9. DSC MAALATTU PS

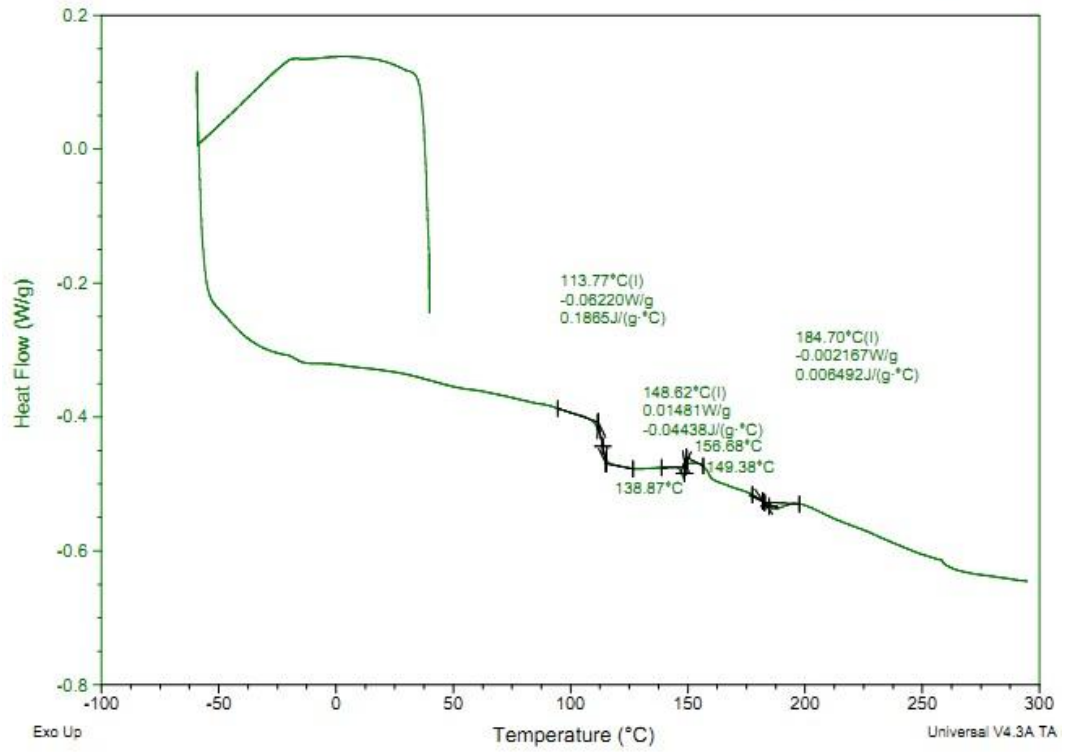


LIITE 10. DSC PC/ABS

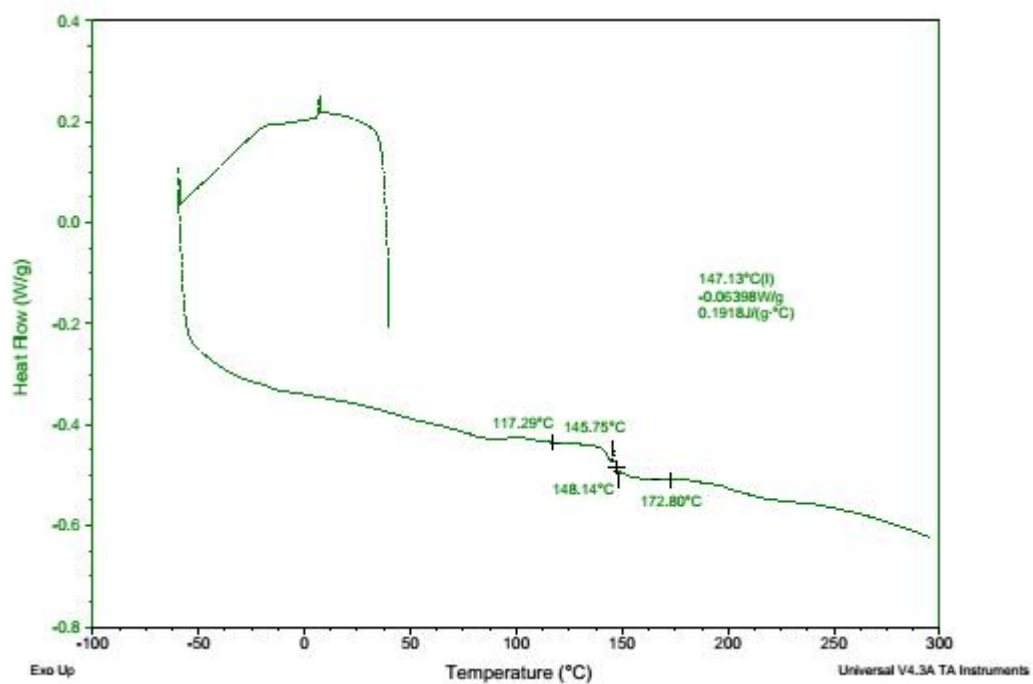
Sample: PC/ABS
Size: 2.1000 mg
Method: Isothermal for
Comment: PCPR

DSC

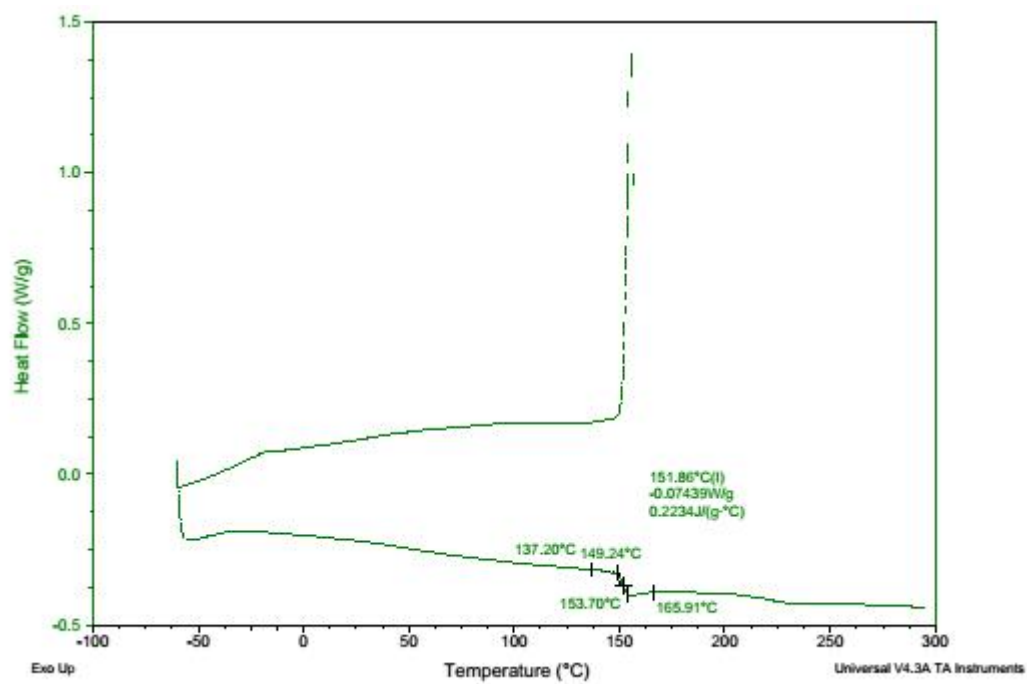
File: C:\TA\Data\DSC\prpc.009
Operator: rh
Run Date: 03-Oct-2013 08:54
Instrument: DSC Q100 V9.8 Build 296



LIITE 11. DSC MUSTA PC



LIITE 12. DSC LÄPINÄKYVÄ PC



LIITE 13. DSC PA

